



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OLLI PERÄLÄ
SILLAN JA RAITIOVAUNUN DYNAAMINEN YHTEISTOIMINTA

Diplomityö

Tarkastaja: Jari Mäkinen
Talouden ja rakentamisen tiedekun-
taneuvosto on hyväksynyt kokouk-
sessaan 14.1.2015 diplomityön tar-
kastajan, aiheen ja kielen.

TIIVISTELMÄ

Olli Perälä: Sillan ja raitiovaunun dynaaminen yhteistoiminta

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 54 sivua

Lokakuu 2015

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Rakennesuunnittelu

Tarkastaja: Associate Professor Jari Mäkinen

Avainsanat: silta, raitiovaunu, dynamiikka, liikkuva kuorma, FEM

Suomessa panostetaan yhä enemmän raitiovaunuliikenteeseen, mutta sillan ja raitiovaunun dynaamista yhteistoimintaa ja tästä syntyvää matkustusepämukavuutta on tutkittu hyvin vähän. Tutkimuksessa oli tarkoitus löytää sopivia menetelmiä ongelman ratkaisuun. Kirjallisuudesta selvitettiin menetelmiä raitiovaunun matkustajan ja sillalla kävelijän epämukavuuden arvioimiseen kiihtyvyyden perusteella. Yhteistoimintaongelman ratkaisuun käytettiin elementtimenetelmään perustuvaa LUSAS ohjelmistoa. Laskentaan käytettiin kahta erilaista menetelmää: moodisummausta ja suoraa integrointia. Eri menetelmillä saadut tulokset vastasivat toisiaan hyvin ja tulosten oikeellisuus todennettiin vertailemalla tuloksia aikaisemmin tehtyihin tutkimustuloksiin.

Raitiovaunun ja sillan dynaamista yhteistoimintaa tutkittiin kuormittamalla erilaisia siltarakenteita yhdellä raitiovaunumallilla, joka vastasi Helsingin kaupungin uusinta Artic-raitiovaunua. Suoritettiin parametrinen tutkimus, jossa sillan muuttujina olivat sillan jännemitta, sillan alin ominaistuuksisuus ja sillan taipuma tasaisesta raitiovaunu-kuormasta. Tutkittiin, millä taipuman arvolla sillalla kävelijän tai raitiovaunun matkustajan epämukavuuden kiihtyvyyssrajat ylittyvät.

Huomattiin, kuinka yksiaukkoiselle sillalle 3 Hz alin ominaistuuksisuus oli sillan jännemittasta riippumatta haitallisin, jolloin syntyi resonanssi-ilmiö. Tuloksista saatiin myös sillan taipumakriteeri matkustusmukavuuden varmistamiseksi. Jännemittaan ja taipuman suhde pieneni aina jännemittaan kasvaessa. Vertailtiin saatuja tuloksia Eurokoodin rautatiesiltojen ohjeistuksiin ja todettiin, etteivät Eurokoodin ohjeet päde raitiovaunuliikenteelle. Tutkimustapauksena suoritettiin Kruunuvuorensillan dynaaminen analyysi. Huomattiin, kuinka kiihtyvyydet jäivät paljon epämukavuusrajoja pienemmiksi, mikä olisi voitu päätellä jo sillan taipuman ja suoritettun parametrisen tutkimuksen perusteella.

ABSTRACT

Olli Perälä: Dynamic Interaction between a Bridge and a Tram

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 54 pages

October 2015

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Associate Professor Jari Mäkinen

Keywords: bridge, tram, dynamics, moving load, FEM

Tram traffic is increasing in Finland, but the dynamic interaction between a bridge and a tram and the discomfort effects have got little attention. The study was to find suitable methods for solving the problem. Acceleration based methods for evaluating the tram passenger and pedestrian discomfort were studied from literature. Finite element method based software LUSAS was used to solve the interaction problem. Two different methods were used to solve the problem: mode superposition method and direct integration. The results obtained by different methods corresponded to each other well and the accuracy of the results was verified by comparing the results to previously made research results.

The dynamic interaction between a bridge and a tram was studied by loading various bridge structures with one tram model, which corresponded to the new Artic-tram of Helsinki. Parametric study was performed by altering the bridge span length, the lowest natural frequency of the bridge and the deflection of the bridge from distributed tram-load. The value of the deflection was varied and it was studied when the pedestrian or tram passenger discomfort acceleration limits were exceeded.

It was noted that for a single-span bridge the 3 Hz lowest natural frequency was most harmful resulting a resonance phenomenon, regardless of the span length. The deflection criteria for checking the passenger comfort was also obtained from the results. The ratio of the span length and deflection always declined as span length increased. The results were compared to the railway regulations of the Eurocode and it was found that the regulations do not apply to the tram traffic. As a case study, the dynamic analysis of the Kruunuvuorensilta was performed. It was noted how accelerations were much smaller than the discomfort criteria, which could have been deduced from the bridge deflection and the performed parametric study.

ALKUSANAT

Työ tehtiin WSP Finland Oy:n Helsingin toimistolla aikavälillä tammikuu-elokuu 2015. Tarkastajana toimi Tampereen teknillisen yliopiston professori Jari Mäkinen. Ohjaajana WSP:ltä toimi Ilkka Ojala ja lisäksi asiantuntijoina ovat toimineet Atte Mikkonen ja Sami Niemelä. Tilaajana ja rahoittajana toimi Helsingin kaupungin rakennusvirasto HKR sekä Helsingin kaupungin liikennelaitos HKL, joiden edustajina ovat toimineet Ville Alajoki (HKR) ja Artturi Lähdetie (HKL).

Haluankin kiittää edellä mainittuja henkilöitä ja tahoja mahdollisuudesta tutkia mielenkiintoista aihetta ja saamastani neuvoista työn teon aikana. Lisäksi haluan kiittää Tampereen teknillistä yliopistoa saamastani opetuksesta ja opiskelukavereitani, jotka ovat olleet tukenani koulutöissä viimeisen seitsemän vuoden aikana. Erityisesti haluan kiittää lähimmäisiäni ja ystäviäni, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet minua opiskelujeni ajan.

Helsingissä 14.8.2015

Olli Perälä

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	IHMISEN ALTISTUMINEN VÄRÄHTELYLLE	3
2.1	Värähtelyn vaikutukset	3
2.2	Julkisen liikenteen matkustajan epämukavuus.....	3
2.3	Painotetun kiihtyvyyden määrittäminen	6
2.4	Sillalla kävelijän epämukavuus	8
3.	LIKKUVAN KUORMAN DYNAMIIKKA.....	10
3.1	Dynamiikan perusteet	10
3.2	Liiketyhtälöiden ratkaisu numeerisesti	13
3.2.1	Moodisummaus.....	14
3.2.2	Suora integrointi	15
3.3	Liikkuva kuorma palkilla	16
3.3.1	Liikkuva pistekuorma.....	18
4.	LASKENTAMENETELMÄT.....	20
4.1	Laskeminen FEM-ohjelmalla	20
4.2	Menetelmien vertailu	21
4.3	Laskelmien todentaminen	24
5.	SILLAN JA RAITIOVAUNUN DYNAAMINEN YHTEISTOIMINTA.....	30
5.1	Rautatiesiltojen dynaaminen analyysi eurokoodissa	30
5.2	Raitiovaunumalli	31
5.3	Tutkimustulokset	33
5.3.1	Yksiaukkoinen silta.....	33
5.3.2	Jatkuva silta	37
5.3.3	Jousitusjärjestelmän vaikutus tuloksiin	38
5.4	Tulosten analysointi.....	39
5.5	Yhteenveto	41
6.	TAPAUSTUTKIMUS: KRUUNUVUORENSILTA	42
6.1	Tausta.....	42
6.2	Laskentamalli	43
6.3	Tulokset.....	44
6.4	Yhteenveto	50
7.	JOHTOPÄÄTÖKSET	51
	LÄHTEET.....	53

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	elementtimenetelmä (Finite Element Method)
FFT	nopea Fourier'n muunnos (Fast Fourier Transform)
ISO	International Organization for Standardization
RMS	neliöllinen keskiarvo (Root Mean Square)
a	kiihtyvyys
a_p	värähtelyn kiihtyvyyden enimmäisarvo
a_w	painotettu kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo
$a_w(t)$	painotettu kiihtyvyyden aikahistoria
A	poikkileikkauksen ala
c	vaimennuskerroin
\mathbf{c}	vaimennusmatriisi
\mathbf{C}	vaimennusmatriisi pääkoordinaatistossa
c_k	kriittinen vaimennuskerroin
d	akseliväli
E	kimmokerroin
f	taajuus
F	voima
$F(t)$	heräte
$\mathbf{F}(t)$	kuormitusvektori
\hat{F}	herätteen amplitudi
I_z	neliömomentti
J	hitausmomentti
k	jäykkyyskerroin
\mathbf{k}	jäykkyysmatriisi
\mathbf{K}	jäykkyysmatriisi pääkoordinaatistossa
L	pituus
m	massa
\mathbf{m}	massamatriisi
\mathbf{M}	massamatriisi pääkoordinaatistossa
n_0	alin ominaistajuus
$\mathbf{P}(t)$	kuormitusvektori pääkoordinaatistossa
\mathbf{q}	siirtymävektori pääkoordinaatistossa
$\dot{\mathbf{q}}$	nopeusvektori pääkoordinaatistossa
$\ddot{\mathbf{q}}$	kiihtyvyysvektori pääkoordinaatistossa
t	aika
Δt	aika-askel
T	värähdysaika
T_m	mittausajan kesto
v	nopeus
W_d	painotuskäyrä vaakasuuntaisiin vaikutuksiin
W_f	painotuskäyrä matkapahoinvoinnin laskemiseen
W_k	painotuskäyrä pystysuuntaisiin vaikutuksiin
x	siirtymä
\dot{x}	nopeus
\ddot{x}	kiihtyvyys

x_{st}	staattinen siirtymä
δ	taipuma
ζ	suhteellinen vaimennuskerroin
ν	Poissonin suhde
ϕ	ominaisvektori
Φ	dynaaminen suurennuskerroin
Φ	modaalimatriisi
ω	ominaiskulmataajuus
ω_d	vaimennetun systeemin ominaiskulmataajuus
Ω	herätteen kulmataajuus

1. JOHDANTO

Suomessa kaupungit haluavat yhä enemmän panostaa julkiseen liikenteeseen ja erityisesti raitiovaunuliikenteeseen. Tästä esimerkkinä voi antaa Tampereen ja Turun aikomukset ottaa raitiovaunuliikenne käyttöön, ja Helsingin suunnitelmat raitioliikenteen laajentamiselle. Rakennettaessa uutta raitiolinjaa joudutaan usein myös rakentamaan siltoja. Helsingin kaupungin raitioliikenteen laajennussuunnitelmiin yhtenä oleellisena osana kuuluukin Kruunuvuorensillan rakentaminen. Valmistuttuaan Kruunuvuorensilta olisi Suomen pisin silta yhdistäen Kruunuvuorenrannan Helsingin kantakaupungin raitioliikenneverkkoon.

Perinteisesti raideliikenteen kuormien dynaamiset vaikutukset on otettu huomioon kertomalla staattisia kuormia dynaamisella suurennuskertoimella ja suorittamalla staattinen analyysi. Kriittisemmissä tapauksissa, joissa lähtötietojen perusteella dynaaminen analyysi on todettu tarpeelliseksi, on dynaamiset vaikutukset huomioitu liikkuvilla piste-kuormilla. Tämä lähestymistapa kuitenkin jättää huomioimatta liikennevälineen ja sillan dynaamisen yhteistoiminnan. Mallintamalla liikenneväline liikkuvana jousi-vaimennusmassasysteeminä saadaan todenmukaisempien tulosten lisäksi selville liikennevälineen kiihtyvyys pystysuunnassa, joka toimii myös mitoitusarvona vaunun matkustajan matkustusmukavuudelle. Kruunuvuorensillan suunnitteleminen on nostanut esille mielenkiinnon tutkia sillan ja raitiovaunun dynaamista yhteistoimintaa, ja tämän vaikutuksia raitiovaunun matkustajan ja sillalla liikkujan mukavuuteen.

Tutkimuksen tarkoitus on löytää sopivia menetelmiä sillan ja raitiovaunun dynaamisen yhteistoimintaongelman ratkaisuun. Tavoitteena on löytää keskeisiä sillan värähtelyyn vaikuttavia tekijöitä ja parantaa rakenteiden dynamiikan ymmärrystä liikkuvien kuormien tapauksessa. Tarkastellaan mitkä asiat vaikuttavat eniten vaunun matkustajan mukavuuteen sekä sillalla kävelijän mukavuuteen. Tavoitteena on myös löytää sillan ominaisuuksia jolloin dynaamisesta yhteistoiminnasta syntyvät kiihtyvyydet jäävät haitallista kiihtyvyyttä pienemmiksi. Näissä tapauksissa tarkempi dynaaminen analyysi voidaan täten jättää suorittamatta, ja keskittyä vain sillan rakenteelliseen kestävyYTEEN.

Tutkitaan kirjallisuudesta menetelmiä käyttömukavuuden arvioimiselle sekä vaunun matkustajan että sillalla kävelijän näkökulmasta. Pääasiallisina lähteinä käytetään ISO standardeja ja eurokoodia, joiden mukavuuskriteerit perustuvat kiihtyvyyden arvoihin. Perehdytään dynaamisen ongelman ratkaisuun yksinkertaisesta yhden vapausasteen värähtelijästä alkaen. Esitetään dynamiikan tehtävän yleinen liikeyhtälö ja menetelmiä tämän ratkaisemiseen. Tutkitaan kirjallisuudesta palkilla liikkuvan kuorman erilaisia laskentamalleja ja pohditaan näiden käyttökelpoisuutta.

Oleellinen osa työtä on sillan ja liikennevälineen yhteistoimintaongelman ratkaisu. Ongelman ratkaisuun käytetään elementtimenetelmään perustuvaa LUSAS ohjelmaa. Laskentamenetelminä käytetään kahta erilaista menetelmää: moodisummausta ja suoraa integrointia. Laskennasta saadaan selville vaunun ja sillan kiihtyvyyden aikahistoriat, joiden perusteella voidaan arvioida vaunun matkustajan ja sillalla kävelijän matkustusmukavuutta.

Raitiovaunumallina käytetään Helsingin raitioliikenteen uusinta ”Artic” raitiovaunua. Tutkitaan vaunun aiheuttamia pystysuuntaisia dynaamisia vaikutuksia erilaisille siltarakenteille vaunun kulkiessa tavanomaisella nopeudella. Tutkimuksen laskentamallina käytetään kaksiulotteista mallia, jolloin huomioidaan vain pystyvärähtelyn vaikutukset. Tutkitaan mahdollisen resonanssi-ilmiö syntymisen raitiovaunun kulkiessa sillan yli vaihdellen sillan massaa, jännemittaa ja jäykkyyttä. Lisäksi tutkimustapauksena luodaan laskentamalli Kruunuvuorensillan dynaamisten vaikutusten arviointiin.

2. IHMISEN ALTISTUMINEN VÄRÄHTELYLLE

Tässä työssä tutkitaan sillan ja raitiovaunun dynaamista yhteistoimintaa ja tämän vaikutusta raitiovaunun matkustajaan ja sillalla kävelijään. Oleellista on selvittää miten ihminen reagoi värähtelylle. Värähtelyn aistiminen on monimutkainen ilmiö, jonka tarkka tutkiminen edellyttää monen tieteenalan ymmärtämistä [1].

2.1 Värähtelyn vaikutukset

Koko vartaloon kohdistuvasta värähtelystä voi syntyä monia erilaisia seurauksia. Oleelliset värähtelyn vaikutukset voidaan jakaa kolmeen kategoriaan: epämukavuus, terveys ja matkapahoinvointi. Matkapahoinvoinnin uskotaan johtuvan kehon havainto-aistien ristiriidasta, mikä syntyy yleensä useiden tuntien altistumisesta matalataajuuksiselle 0.125..0.25 hertsin värähtelylle [2]. Sillan värähtelyn ei siis pitäisi synnyttää matkapahoinvointia johtuen lyhyestä altistumisajasta ja korkeammista taajuuksista. Epämukavuuskriteerejä tutkittaessa tulee myös huomioitua terveydelliset hättäväikutukset, sillä yleinen käsitys on, että terveydelle haitallisten värähtelyiden kiihtyvyydet ovat huomattavasti suurempia kuin epämukavuuden kiihtyvyydet [1][2][3].

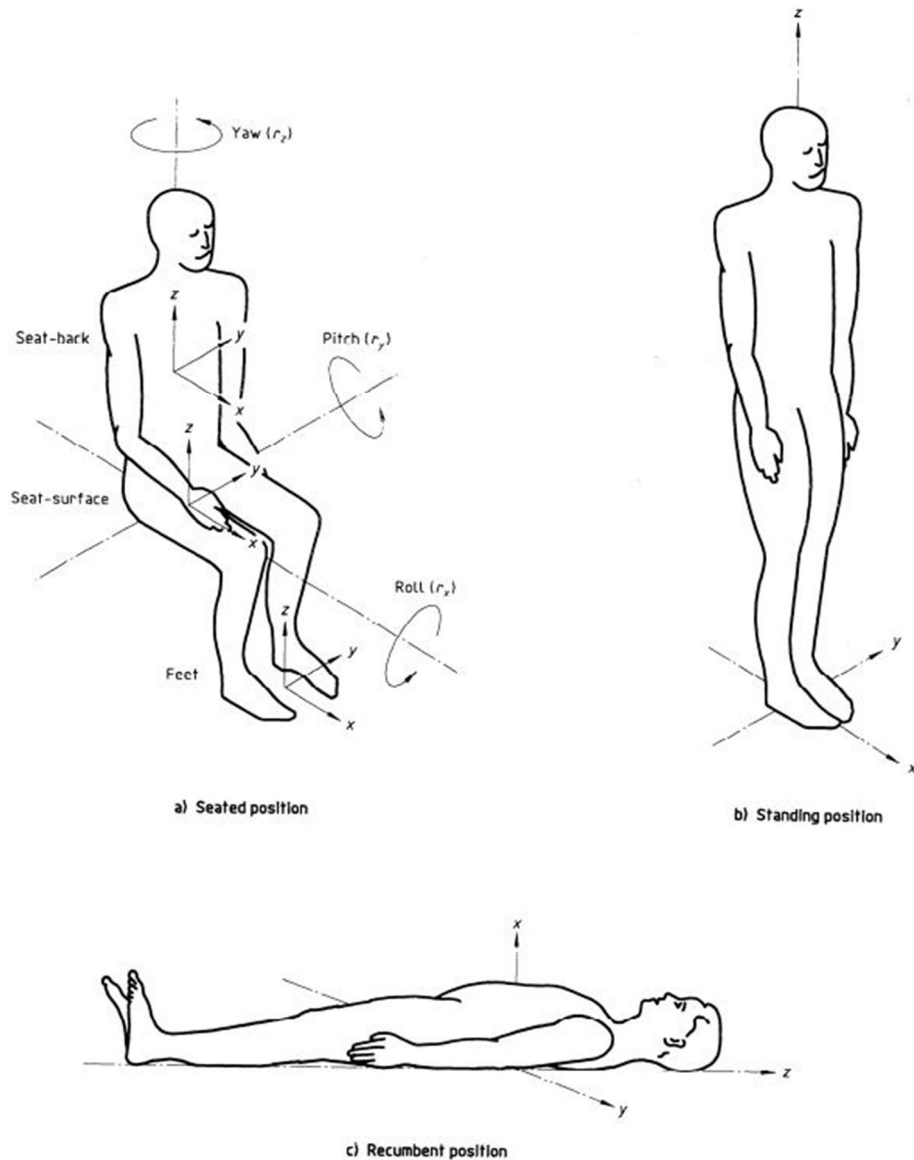
Värähtelystä johtuva epämukavuus on kuitenkin hyvin vaikeasti määriteltävissä ja riippuu paljon tarkastelijasta ja tilanteesta. Jotkut ihmiset ovat luonnostaan herkempiä värähtelylle ja joissain tilanteissa värähtelyä sallitaan enemmän kuin toisissa. Esimerkiksi rakennuksen sisällä pienikin värähtely tuntuu epämukavalta, mutta bussilla liikkuessaan ihminen olettaa altistuvansa värähtelylle. Epämukavuus voi ilmetä yleisenä ärsytyksenä tai hättänä suorittaa jotain toimintaa, kuten vaikeutena nukahtaa, lukea tai kirjoittaa. [1][2]

Värähtelystä aiheutuvan epämukavuus riippuu värähtelyn voimakkuudesta, värähtelyn taajuudesta, värähtelyn suunnasta ja sijainnista sekä värähtelyn kestosta [2]. Värähtelyn epämukavuutta on tutkittu lukuisilla kokeellisilla tutkimuksilla joihin standardien epämukavuusarvot perustuvat [1].

2.2 Julkisen liikenteen matkustajan epämukavuus

Yleisin standardi julkisen liikenteen värähtelyn epämukavuuden raja-arvojen määrittämiseen on ISO 2631. Standardi ilmestyi ensimmäisen kerran vuonna 1974 ja on muuttunut paljon vuosien aikana koostuen nykyään osista 1, 2, 4 ja 5. Osan ISO 2631-1 uusin versio on vuodelta 1997 sisältäen yleiset vaatimukset ihmiseen kohdistuvalle värähtelylle.

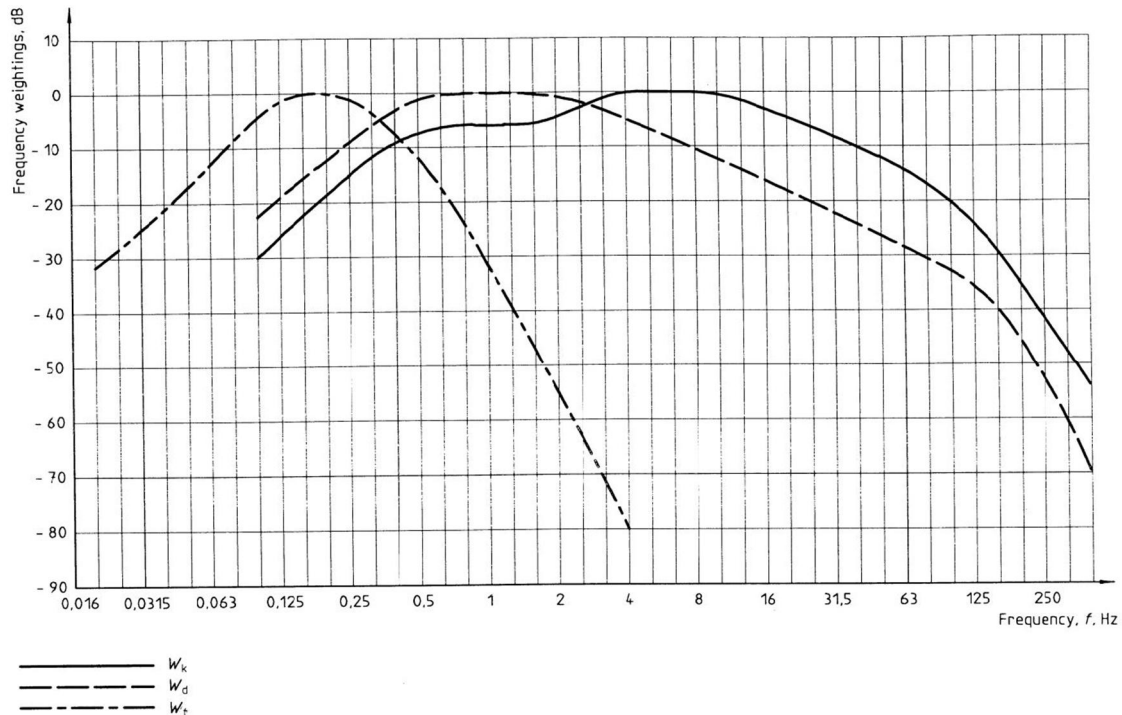
Standardin laskenta perustuu värähtelyn kiihtyvyyden neliölliseen keskiarvoon (engl. root mean square, RMS) kullekin koordinaattiakselille. Ihmisen keholle on luotu koordinaattiakselit istuvalle, seisovalle ja makaavalle asennolle (Kuva 2.1). Koska ihminen on herkempi tietyn taajuiselle värähtelylle, painotetaan akselien värähtelyiden kiihtyvyyden arvoja taajuudesta riippuvalla painotuskäyrällä. [3]



Kuva 2.1 Ihmisen kehon koordinaattiakselit värähtelymittauksessa [3].

Standardi esittää kuusi erilaista painotuskäyrää, joista kolme on esitetty (Kuva 2.2). Painotuskäyrää W_k käytetään pääasiassa pystysuuntaisiin vaikutuksiin, W_d käyrää vaakasuuntaisiin vaikutuksiin ja W_f käyrää matkapahoinvoinnin laskemiseen. Lisäksi standardi esittää painotuskäyriä rotaatiovaikutuksille ja selkätuen edestakaiselle liikkeelle, sekä menetelmiä näiden vaikutusten yhteen laskemiseksi. Tässä työssä olemme

kuitenkin kiinnostuneita pystysuuntaisen värähtelyn vaikutuksista, joten keskitymme painotuskäyrään W_k , joka on esitetty kuvassa yhtenäisellä viivalla. [3]



Kuva 2.2 Värähtelyn painotuskäyrät W_k , W_d ja W_f ISO 2631-1 mukaan [3]

Painotetun kiihtyvyyden neliöllinen keskiarvo (RMS) määritetään kaavalla

$$a_w = \left[\frac{1}{T_m} \int_0^{T_m} (a_w(t))^2 dt \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (2.1)$$

jossa $a_w(t)$ on painotettu kiihtyvyyden aikahistoria (m/s^2) ja T_m on mittausajan kesto (s). Kiihtyvyyden RMS arvojen käyttökelpoisuus värähtelyn voimakkuuden määrittämiseen täytyy vielä varmentaa laskemalla suhde a_p/a_w , jossa a_p on värähtelyn enimmäisarvo. Mikäli tämä on suurempi kuin 9, RMS arvoa ei voi käyttää, vaan on turvauduttava muihin menetelmiin. [3]

Standardissa ei anneta yleistä arvoa värähtelyn epämukavuudelle, koska epämukavuus riippuu monesta tekijästä ja vaihtelee tilanteen mukaan. Kuitenkin julkisen liikenteen matkustajan todennäköiset reaktiot värähtelyyn kiihtyvyyden arvoina on annettu (Taulukko 2.1). Reaktiot riippuvat tosin lisäksi odotettavasta matkan pituudesta, matkustajan toiminnasta, kuten lukeminen, syöminen tai kirjoittaminen, sekä monista muista tekijöistä, kuten äänistä ja lämpötilasta. [3]

Taulukko 2.1 Matkustajan todennäköiset reaktiot värähtelyyn [3].

Värähtelyn kiihtyvyyden arvo	Epämukavuus
Pienempi kuin 0.315 m/s^2	Ei epämukavaa (not uncomfortable)
$0.315 \text{ m/s}^2 - 0.63 \text{ m/s}^2$	Vähän epämukavaa (a little uncomfortable)
$0.5 \text{ m/s}^2 - 1 \text{ m/s}^2$	Melko epämukavaa (fairly uncomfortable)
$0.8 \text{ m/s}^2 - 1.6 \text{ m/s}^2$	Epämukavaa (uncomfortable)
$1.25 \text{ m/s}^2 - 2.5 \text{ m/s}^2$	Hyvin epämukavaa (very uncomfortable)
Suurempi kuin 2 m/s^2	Erittäin epämukavaa (extremely uncomfortable)

2.3 Painotetun kiihtyvyyden määrittäminen

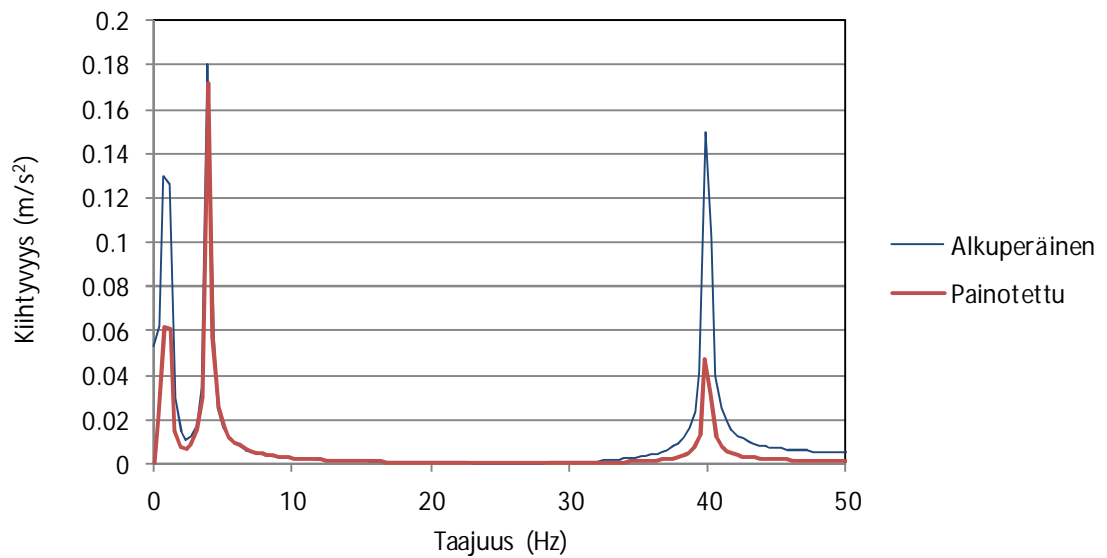
Kiihtyvyyden painottamisen standardin ISO 2631-1 mukaisilla painotuskäyrillä pystyy suorittamaan Fourier'n muunnoksen avulla. Ideana on muuntaa kiihtyvyyden aikahistoria Fourier'n muunnoksen avulla kiihtyvyysspektri, joka on taajuuden funktio. Tämän jälkeen kiihtyvyysspektri kerrotaan suodattimella, joka edustaa standardin ISO 2631-1 mukaista painotuskäyrää. Painotettu kiihtyvyysspektri muutetaan takaisin ajan funktioksi käänteisellä Fourier'n muunnoksella ja saadaan tuloksena painotettu kiihtyvyyden aikahistoria.

Havainnollistetaan menetelmää luomalla kuviteltu kiihtyvyyden aikahistoria funktiolla

$$a(t) = 0.2\sin(2\pi f_1 t) + 0.2\sin(2\pi f_2 t) + 0.2\sin(2\pi f_3 t), \quad (2.2)$$

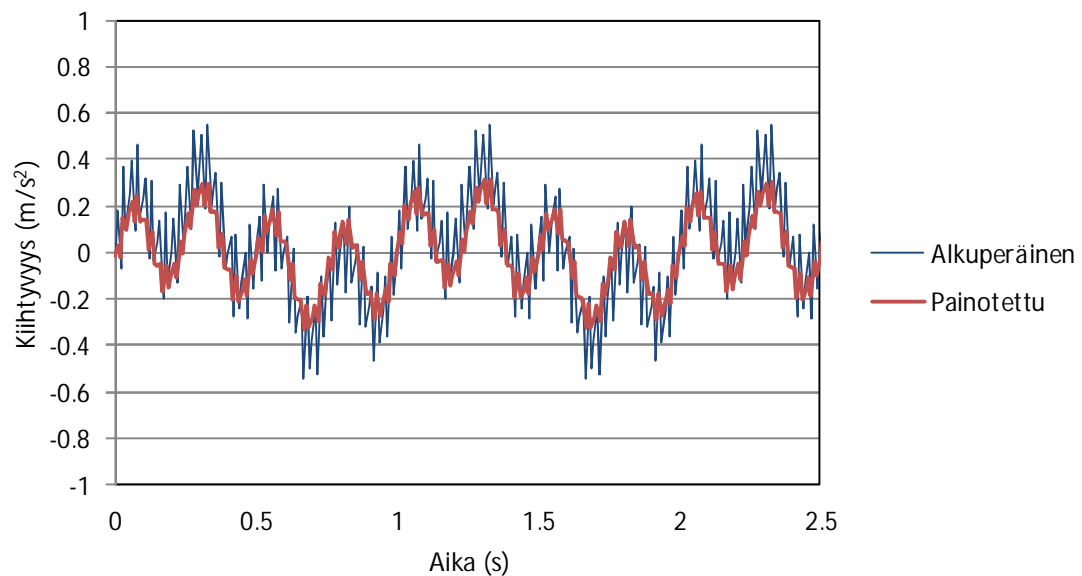
jossa $f_1 = 1 \text{ Hz}$, $f_2 = 4 \text{ Hz}$ ja $f_3 = 40 \text{ Hz}$. Muunnetaan funktio kiihtyvyysspektri Fourier'n muunnoksella käyttäen Microsoft Excel -ohjelmaa. Excelissä on valmis Fourier muunnoksen työkalu, joka käyttää nopeaa Fourier'n muunnosta (Fast Fourier Transform, FFT). Fourier'n muunnoksen teoriaa löytyy kirjallisuudesta [4], johon ei kuitenkaan tässä tarkemmin perehdytä.

Standardissa ISO 2631-1 esitettyjen kertoimien avulla voidaan luoda Exceliin suodatin, jolla kerrotaan kiihtyvyysspektriä. Alkuperäinen ja painotuskäyrällä W_k painotettu kiihtyvyysspektri on esitetty (Kuva 2.3). Huomataan, että taajuuden arvoilla 1 Hz, 4 Hz ja 40 Hz näkyy kiihtyvyysspektrissä selkeä huippuarvo, mikä olikin odotettu tulos. Standardin taulukosta nähdään, että käyrän W_k kertoimet taajuuksille 1 Hz, 4 Hz ja 40 Hz ovat 0.484, 0.967 ja 0.314. Painotettu kiihtyvyysspektri vastaa hyvin näitä arvoja.



Kuva 2.3 Alkuperäinen ja painotettu kiihtyvyyspektri.

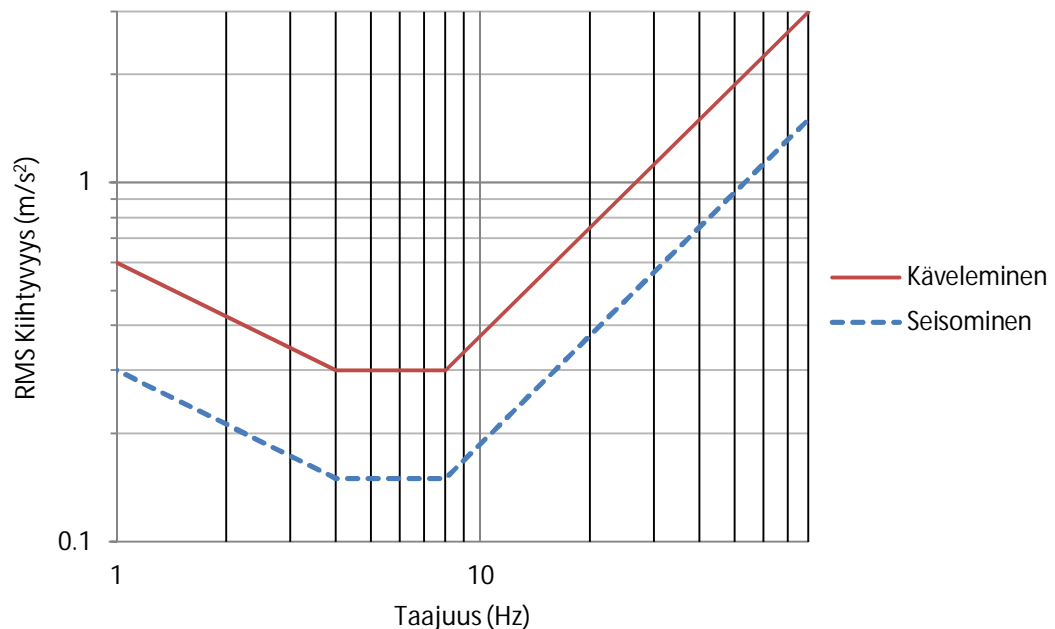
Käänteisellä Fourier'n muunnoksella saadaan painotettu kiihtyvyyspektri muunnettua takaisin aikahistoriaksi (Kuva 2.4). Kuvasta nähdään kuinka painotetussa kiihtyvyydessä 1 Hz ja 40 Hz taajuiset tekijät ovat pienentyneet 4 Hz muuttuessa määräävimäksi taajuudeksi. Painotetun kiihtyvyyden neliölliseksi keskiarvoksi saadaan 0.154 m/s^2 enimmäisarvon ollessa 0.329 m/s^2 . Enimmäisarvon ja keskiarvon suhteeksi saadaan 2.13, joten neliöllistä keskiarvoa voidaan käyttää kiihtyvyyden arvona. Taulukosta 2.1 nähdään, että kyseisen kiihtyvyys ei siten standardin mukaan olisi julkisen liikenteen matkustajalle epämukavaa.



Kuva 2.4 Alkuperäinen ja painotettu kiihtyvyyden aikahistoria.

2.4 Sillalla kävelijän epämukavuus

Eurokoodissa [5] on annettu kevyen liikenteen pystysuuntaisen värähtelyn kiihtyvyyden suositeltavaksi enimmäisarvoksi 0.7 m/s^2 . Kriteerin toteutuminen osoitetaan, jos kannen alin ominaistaaajuus on alle 5 Hz pystysuuntaisessa värähtelyssä. Standardissa ISO 10137:2007 [6] esitetään tarkempi menetelmä pystysuuntaisen värähtelyn raja-arvon määrittämiseen. Kiihtyvyyden RMS arvoille on annettu epämukavuuden raja-arvon peruskäyrä taajuuden funktiona, jota kerrotaan eri kertoimilla riippuen tilanteesta. Esimerkiksi kriittisen työn alueella kuten sairaalan leikkaussalissa tai laboratoriossa kerroin on 1. Kävelytien kertoimet ovat kävelemiselle 60 ja seisomiselle 30, joiden raja-arvokäyrät on esitetty (Kuva 2.5). Standardissa suositeltu kiihtyvyyden RMS arvojen laskenta-aika on 1 s.



Kuva 2.5 Kävelytien epämukavuuden raja-arvokäyrä taajuuden funktiona standardin ISO 10137:2007 mukaan.

Eurokoodin ja ISO standardin raja-arvoja ei voi suoraan verrata toisiinsa, koska eurokoodin arvo on kiihtyvyyden enimmäisarvo ja standardin arvot ovat kiihtyvyyden RMS arvoja. Harmonisen sinimuotoisen värähtelyn RMS arvo on $a_p/\sqrt{2}$. Täten sinimuotoisen värähtelyn, jonka enimmäisarvo on eurokoodin raja-arvo 0.7 m/s^2 , RMS arvo on 0.5 m/s^2 . Kuvasta 2.5 nähdään, että ISO standardin menetelmässä tämä olisi siis kävelemisen raja-arvo 1.5 Hz taajuiselle värähtelylle.

Tutkitaan vielä vertailutapauksena kaavan (2.2) määrittämää kiihtyvyyttä. Kiihtyvyyden enimmäisarvo on 0.546 m/s^2 , joka on 78 % eurokoodin raja-arvosta. Raja-arvokäyrää vastaavalla painotuskäyrällä painotettu RMS arvo on 0.17 m/s^2 , joka on 57 % ISO stan-

dardin kävelemisen alimmasta raja-arvosta (0.3 m/s^2) ja 114 % seisomisen alimmasta raja-arvosta (0.15 m/s^2). Eurokoodin raja-arvo osuu siis näiden väliin.

ISO standardin laskentatapa ottaa huomioon kiihtyvyyden taajuuden, ja menetelmän raja-arvot ovat eritelty seisomiselle ja kävelemiselle. Menetelmä on tarkempi, mutta raja-arvo on huomattavasti monimutkaisempi määrittää kuin eurokoodin menetelmässä. Eurokoodin menetelmä pyrkii esittämään saman asian yksinkertaistetusti, ja tuloksista nähdään nopeasti onko mukavuusongelmien syntyminen todennäköistä.

3. LIIKKUVAN KUORMAN DYNAMIIKKA

Sillalla vaikuttavat liikennekuormat ovat aina ajasta riippuvia kuormituksia. Yleensä kuitenkin dynaamiset vaikutukset on huomioitu kuormien lisäkertoimella ja sillalle suoritetaan vain staattinen analyysi. Raideliikenteen tapauksessa kuitenkin dynaamiset vaikutukset riippuvat hyvin paljon liikenteen ja sillan ominaisuuksista, ja joskus joudutaankin suorittamaan ajasta riippuvainen dynaaminen analyysi. Dynaamisesta analyysistä voidaan saada myös selville sillan ja liikennevälineen kiihtyvyyksien aikahistoriat, jotka toimivat matkustusmukavuuden arvioimisen perustana. Dynamiikan tehtävä muodostuu kuitenkin huomattavasti monimutkaisemmaksi kuin statiikan tehtävä.

3.1 Dynamiikan perusteet

Mekaanisen systeemin värähtelyksi kutsutaan sellaista liikettä, joka toistuu määräjän kuluttua joko täysin tai melkein samanlaisena. Ominaisvärähtelyllä tarkoitetaan toistuvaa liikettä, joka syntyy kun systeemi poikkeutetaan tasapainoasemastaan ja päästetään liikkumaan vapaasti, jolloin palautusvoimat yrittävät palauttaa systeemin takaisin tasapainoasemaan. Yhteen värähdysliikkeeseen kulunutta aikaa T sanotaan ominaisvärähdysajaksi. Suuretta $f = 1/T$ sanotaan systeemin ominaistaajuudeksi, jonka yksikkö on Hz (hertsi). [7]

Jos värähtelevällä systeemillä ei ole ulkoista eikä sisäistä kitkaa, kutsutaan värähtelyä vaimenemattomaksi, jolloin systeemin värähtely jatkuu ikuisesti. Yhden vapausasteen vaimentamattoman värähtelijän (Kuva 3.1a) liikeyhtälö saadaan vapaakappalekuvasta Newtonin 2. peruslain mukaan muotoon $-kx = m\ddot{x}$, jossa k on jousen jäykkyyskerroin, x siirtymä, m massa ja \ddot{x} kiihtyvyys. Derivointia ajan suhteen merkitään lisäämällä derivoitavan suureen päälle piste. Ottamalla käyttöön merkintä

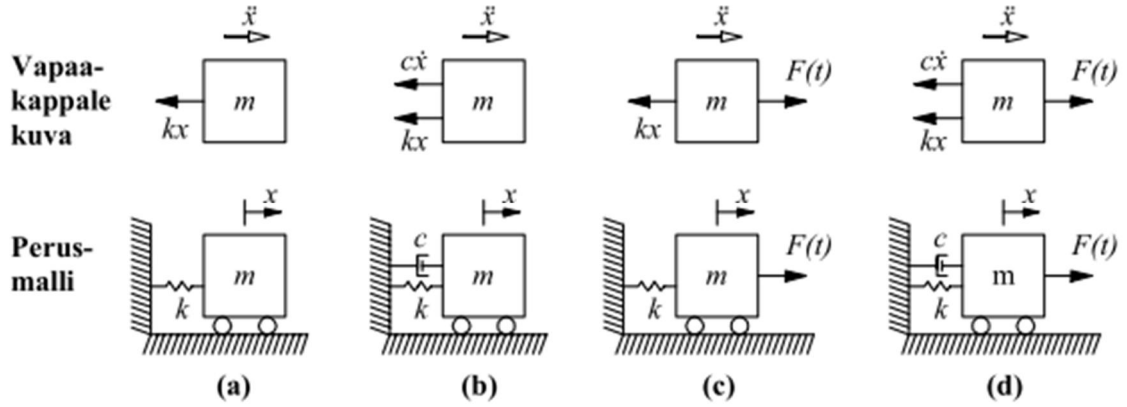
$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (3.1)$$

saadaan harmonisen värähdysliikkeen differentiaaliyhtälö

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \quad (3.2)$$

Suuretta ω kutsutaan ominaiskulmataajuudeksi, josta saadaan ominaistaajuus kaavalla

$$f = \frac{\omega}{2\pi}. \quad [7] \quad (3.3)$$



Kuva 3.1 Vaimentamaton värähtelijä (a), vaimennettu värähtelijä (b), vaimentamaton pakkovärähtelijä (c) ja vaimennettu pakkovärähtelijä (d).

Todellisen systeemin värähtely on kuitenkin aina vaimenevaa. Vaimennusta voidaan kuvata erilaisilla malleilla, mutta tässä työssä käsitellään vain viskoosia vaimennusta. Viskoosin vaimennuksen vaimennusvoima on verrannollinen värähtelevän systeemin partikkelien nopeuteen (Kuva 3.1b). Värähdysliikkeen differentiaaliyhtälöksi saadaan

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (3.4)$$

jossa c on vaimennuskerroin ja \dot{x} nopeus. Systeemillä on olemassa kriittinen vaimennuskerroin c_k , jolla systeemi saavuttaa tasapainoasemansa ensimmäisen värähdysliikkeen lopuksi ja se saadaan kaavasta $c_k = 2m\omega$. Merkitsemällä suhteellista vaimennuskerrointa $\zeta = c/c_k$, saadaan vaimennetun värähtelijän differentiaaliyhtälö muotoon

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = 0. \quad (3.5)$$

Suhteellisen vaimennuskertoimen ollessa 1 kutsutaan vaimennusta kriittiseksi. Kun ζ on suurempi kuin 1, vaimennus on ylikriittinen. Yleensä kuitenkin vaimennus on alikriittistä ($\zeta < 1$). Tällöin vaimennetun systeemin ominaiskulmataajuus on

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega. \quad [7] \quad (3.6)$$

Viskoosi vaimennus siis pienentää hieman systeemin ominaiskulmataajuutta ja suurentaa ominaisvärähdysaikaa. Kuitenkin esimerkiksi suhteellisen vaimennuksen arvolla 0.1 (10 %) vaimennus pienentää ominaistaajuutta kertoimella 0.995. Siltojen vaimennus on yleensä alle 5 %, jolloin vaimennuksen vaikutus sillan ominaistaajuuden suuruuteen on siis lähes olematon.

Pakkovärähtelyksi kutsutaan värähtelyä, johon palautusvoimien lisäksi vaikuttaa jaksollisesti muuttuvia pakkovoimia $F(t)$. Vaimentamattoman pakkovärähtelijän (Kuva 3.1c) liikeyhtälöksi saadaan

$$m\ddot{x} + kx = F(t) . \quad (3.7)$$

Jaksollisen herätteen erityistapauksena on harmoninen heräte $F(t) = \hat{F} \sin(\Omega t)$, jossa \hat{F} on herätteen amplitudi ja Ω herätteen kulmataajuus. Herätteen kulmataajuuden Ω ollessa yhtä suuri systeemin ominaiskulmataajuuden ω kanssa systeemin siirtymävaste $x(t)$ kasvaa rajatta ajan mukana. Ilmiötä kutsutaan resonanssiksi, jonka syntymistä rakenteiden suunnittelijan on pyrittävä välttämään. [7]

Vaimennetun pakkovärähtelijän (Kuva 3.1d) yhtälö saadaan muotoon

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t) . \quad (3.8)$$

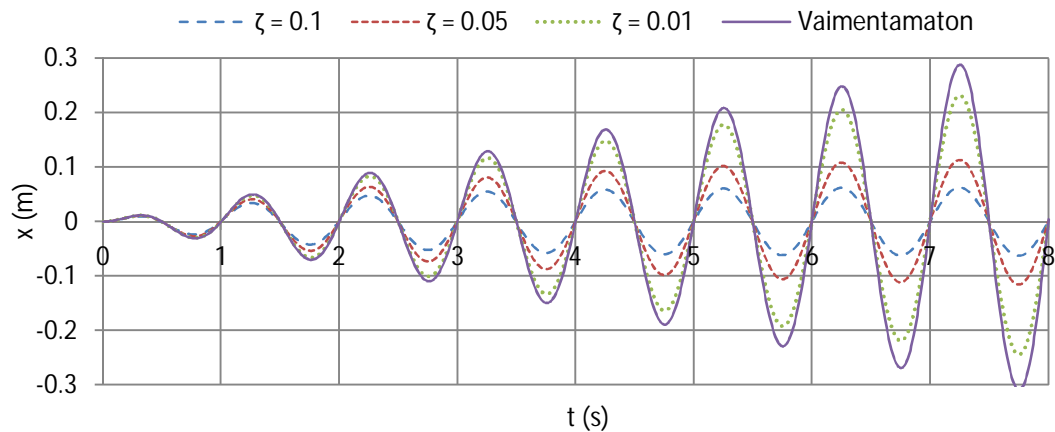
Harmonisen herätteen tapauksessa yhtälö voidaan kirjoittaa muodossa

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega\dot{x} + \omega^2x = \omega^2x_{st} \sin(\Omega t), \quad (3.9)$$

jossa x_{st} on staattinen siirtymä voimasta \hat{F} , joka saadaan kaavalla $x_{st} = \hat{F} / k$. Resonanssitapauksessa $\Omega = \omega$, jolloin differentiaaliyhtälöstä (3.9) voidaan ratkaista siirtymävaste

$$x(t) = \frac{x_{st}}{2\zeta} \left(\sin(\omega t) - \left(\frac{\omega}{\omega_d} \right) e^{-\zeta\omega t} \sin(\omega_d t) \right). \quad [7] \quad (3.10)$$

Käytännön rakenteilla on aina vaimennusta, jolloin resonanssivaste ei pääse kasvamaan rajattomasti. Havainnollistetaan tilannetta antamalla yhden vapausasteen vaimennetulle pakkovärähtelijälle arvot $m = 2 \text{ kg}$ ja $k = 79 \text{ N/m}$, jolloin ominaistajuudeksi f saadaan 1 Hz. Harmonisen herätteen amplitudi \hat{F} on 1 N ja taajuus sama systeemin ominaistajuuden kanssa, jolloin syntyy resonanssi-ilmiö. Sijoitetaan arvot kaavaan (3.10) vaihdellen suhteellisen vaimennuksen arvoa. Värähtelijän vaste eri suhteellisen vaimennuksen arvoilla on näytetty kuvassa 3.2. Nähdään, kuinka lisäämällä vaimennusta värähtelijä saavuttaa pysyvien värähtelyjen vasteen nopeammin. Vaimentamattoman värähtelijän vaste kasvaa rajatta ajan mukana.

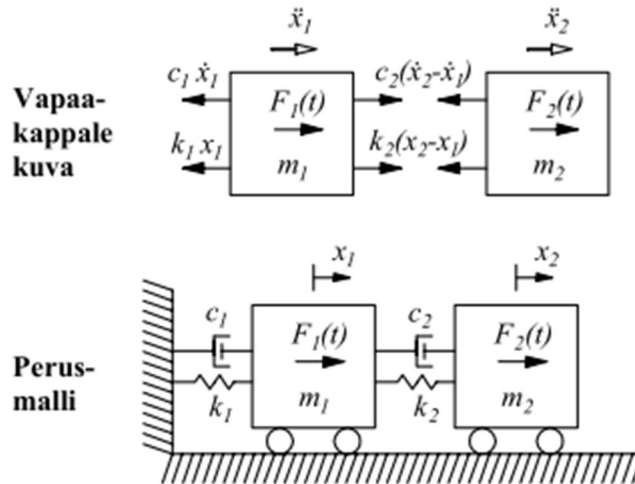


Kuva 3.2 Värähtelijän vaste resonanssissa eri suhteellisen vaimennuksen arvoilla.

Dynamiikan liikeyhtälön ratkaisu menee sitä työläämmäksi mitä enemmän vapausasteita systeemillä on. Kuvan 3.3 kahden vapausasteen systeemin liikeyhtälöt saadaan Newtonin 2. peruslain perusteella muotoon

$$m_1\ddot{x}_1 + c_1\dot{x}_1 + k_1x_1 - c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) = F_1(t) \quad (3.11)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) = F_2(t). \quad (3.12)$$



Kuva 3.3 Kahden vapausasteen värähtelijä.

Liikeyhtälöt voidaan esittää myös muodossa

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

Yhtälö (3.13) voidaan esittää lyhyemmin matriisimuodossa

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F(t), \quad (3.14)$$

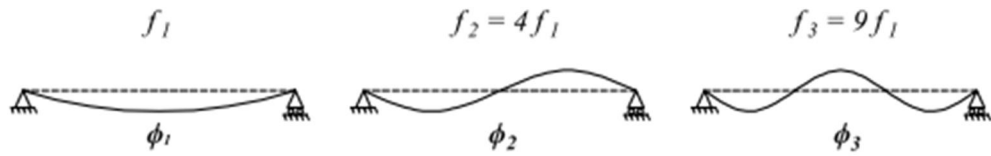
jossa m on massamatriisi, c vaimennusmatriisi, k jäykkyyismatriisi ja $F(t)$ kuormitusvektori. Yhtälö (3.14) on rakenteiden dynamiikan tehtävän yleinen liikeyhtälö.

3.2 Liikeyhtälöiden ratkaisu numeerisesti

Käytännön rakenteilla on useita vapausasteita, ja ongelman ratkaisu analyttisesti menee vaikeaksi ja joskus jopa mahdottomaksi. Dynamiikan ongelmissa turvaudutaankin usein numeeriseen ratkaisuun. Numeerisena ratkaisumenetelmänä käytetään yleensä moodisummausta (Mode Superposition) tai suoraa integrointia (Direct Integration).

3.2.1 Moodisummaus

Tarkastelemalla värähtelevää rakennetta ääriasennossa saadaan kuva rakenteen muodonmuutoksesta, joka on tunnusomainen kyseiselle värähdysliikkeelle. Tätä muodonmuutostilaa kutsutaan rakenteen ominaismuodoksi. Värähtelevällä kappaleella on useita erilaisia ominaismuotoja, joiden lukumäärä on yhtä suuri kuin rakenteen vapausasteiden lukumäärä. Jatkuvan rakenteen, kuten elastisen palkin ominaismuotojen määrä on siis ääretön. Esimerkiksi kuvassa 3.4 on esitetty vapaasti tuetun palkin kolme alinta ominaismuotoa. Usein rakenteilla alin ominaismuoto vastaa staattista taipumaviivaa omasta painosta. [8]



Kuva 3.4 Vapaasti tuetun palkin kolme alinta ominaismuotoa.

Moodisummausmenetelmässä hyödynnetään rakenteen tunnettuja ominaisaajuuksia ja näitä vastaavia ominaismuotoja. Kutakin ominaismuotoa kuvaa ominaisvektori $\boldsymbol{\phi}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$). Valitsemalla ominaisvektoreita p kappaletta ($p \leq n$) voidaan kirjoittaa modaalmatriisi

$$\boldsymbol{\Phi} = [\boldsymbol{\phi}_1 \quad \boldsymbol{\phi}_2 \quad \dots \quad \boldsymbol{\phi}_p]. \quad (3.15)$$

Suoritetaan dynamiikan liikeyhtälön (3.14) muunnos pääkoordinaatistoon merkitsemällä

$$\mathbf{x} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{q}, \quad \mathbf{M} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \boldsymbol{\Phi}, \quad \mathbf{K} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{k} \boldsymbol{\Phi}, \quad \mathbf{P}(t) = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{F}(t) \text{ ja } \mathbf{C} = \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{c} \boldsymbol{\Phi}. \quad (3.16)$$

Näin saadaan

$$\mathbf{M} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{P}(t). \quad (3.17)$$

Kun ominaisvektorit on normeerattu massamatriisin suhteen ($\boldsymbol{\phi}_i^T \mathbf{m} \boldsymbol{\phi}_i = 1$) ja käytetään suhteellista vaimennusta, matriiseista \mathbf{M} , \mathbf{C} ja \mathbf{K} saadaan diagonaalmatriisit

$$\mathbf{M} = \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$\mathbf{C} = 2\boldsymbol{\zeta}\boldsymbol{\omega} = 2 \begin{bmatrix} \zeta_1 \omega_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \zeta_p \omega_p \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

$$\mathbf{K} = \boldsymbol{\omega}^2 = \begin{bmatrix} \omega_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \omega_p^2 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

ja yhtälö (3.17) saadaan muotoon

$$\ddot{\mathbf{q}} + 2\boldsymbol{\zeta}\boldsymbol{\omega}\dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\omega}^2\mathbf{q} = \mathbf{P}(t). \quad (3.21)$$

Edelleen yksittäisen ominaismuodon liikeyhtälöksi saadaan

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i\omega_i\dot{q}_i + \omega_i^2q_i = P_i(t). \quad (3.22)$$

Huomataan, kuinka pääkoordinaatistossa liikeyhtälöt ovat separoituneet kukin omaksi yhtälökseen, jolloin jokaisen ominaismuodon liikeyhtälöä voidaan käsitellä kuten yhden vapausasteen värähtelyä. Tosin sillä ehdolla, että vaimennuksena on käytettävä suhteellista viskoosia vaimennusta. [8]

Kertomalla alkuehtoja

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(0) &= \boldsymbol{\Phi} \mathbf{q}(0) \\ \dot{\mathbf{x}}(0) &= \boldsymbol{\Phi} \dot{\mathbf{q}}(0) \end{aligned} \quad (3.23)$$

termillä $\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m}$ ja ottamalla huomioon normeerausehto $\boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \boldsymbol{\Phi} = \mathbf{I}$ saadaan

$$\begin{aligned} \mathbf{q}(0) &= \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \mathbf{x}(0) \\ \dot{\mathbf{q}}(0) &= \boldsymbol{\Phi}^T \mathbf{m} \dot{\mathbf{x}}(0) \end{aligned} \quad (3.24)$$

Liikeyhtälöistä (3.22) voidaan ratkaista alkuehdoilla (3.24) yksittäisen ominaismuodon vaste pääkoordinaatistossa. Kokonaisvaste alkuperäisessä koordinaatistossa saadaan summaamalla pääkoordinaatiston vasteet kaavalla

$$\mathbf{x}(t) = \sum_{i=1}^p \boldsymbol{\Phi}_i q_i(t). \quad (3.25)$$

Moodisummaus hyödyntää siis rakenteen tunnettuja ominaistaajuuksia ja ominaismuotoja. Menetelmä on tehokkaimmillaan silloin, kun laskennassa saavutetaan vaadittava tarkkuus käyttämällä vain muutamia alimpia ominaismuotoja. Huomattavaa on, että yleensä rakenteilla alimpien ominaistaajuuksien vaikutukset dynaamiseen vasteeseen ovat merkittävimpiä. Näin ollen korkeampien taajuuksien ominaismuodot voidaan jättää pois laskennasta ja moodisummauksen avulla voidaan keventää laskentaa huomattavasti. [9]

3.2.2 Suora integrointi

Rakenteiden dynamiikan tehtävän liikeyhtälö (3.14) voidaan ratkaista myös integroimalla numeerisesti suoraan alkuarvoista muuntamatta sitä erilaiseen muotoon. Tällöin

liikeyhtälöä ei pyritä toteuttamaan jokaisella ajan hetkellä t , vaan tiettyinä ajan hetkinä t_i , jotka ovat aika-askeleen $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ päässä toisistaan. Kussakin pisteessä t_i liikeyhtälöä pidetään kuvitteellisena tasapainoyhtälönä, joka ratkaistaan statiikan tehtävän ratkaisumenetelmin. Kullakin aikavälillä Δt kiihtyvyyden, nopeuden ja siirtymien oletetaan muuttuvan tietyllä tavalla. [8]

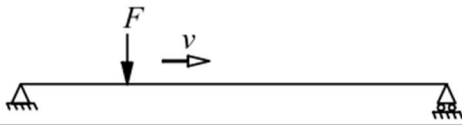
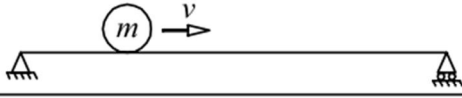
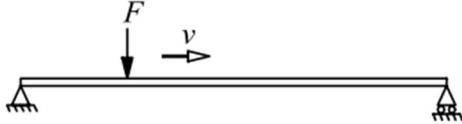
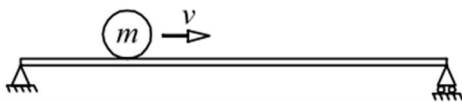
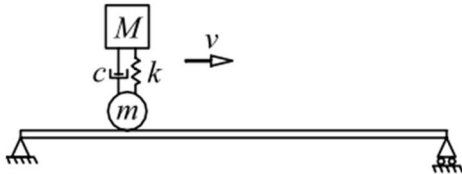
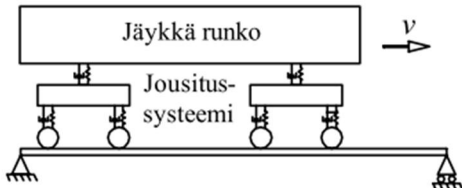
Suoran integroinnin menetelmiä on useita ja ne voidaan jakaa eksplisiittisiin ja implisiittisiin menetelmiin. Eksplisiittisessä menetelmässä liikeyhtälön ratkaisu etsitään ajanhetkellä t ja implisiittisessä menetelmässä ajanhetkellä $t + \Delta t$. Eksplisiittinen menetelmä on ehdollisesti stabiili, mikä tarkoittaa sitä, että laskenta edellyttää kriittistä aika-askeleta pienemmän aika-askeleen käyttöä. Implisiittisessä menetelmässä aika-askeleen valinta vaikuttaa enemmän laskennan tarkkuuteen kuin stabiiliuteen ja sopivin parametrein implisiittinen menetelmä on ehdoitta stabiili. Eksplisiittisistä menetelmistä yleisin on keskeisdifferenssimenetelmä. Implisiittisiä menetelmiä ovat muun muassa Wilsonin θ -menetelmä ja Newmarkin menetelmä. [8][9]

Sopivan aika-askeleen Δt valitseminen on oleellinen osa suoralla integroinnilla suoritettavaa dynaamista analyysiä. Liian suuri aika-askel johtaa epätarkkoihin tuloksiin ja laskennan epävakauteen, kun taas liian pieni aika-askel johtaa raskaaseen laskentaan ja tarpeettoman pitkiin laskenta-aikoihin. Aika-askeleen valinnassa voidaan hyödyntää sitä tietoa, että vain alimmat ominaisuudet vaikuttavat oleellisesti tulokseen. Implisiittisessä laskentamenetelmässä voidaan aika-askeleen sopivalla valinnalla suodattaa pois ylemmät ominaistajuudet, joiden vaikutus tuloksiin on vähäinen. Implisiittisen laskentamenetelmän aika-askeleeksi suositellaan $\Delta t \leq T_{max}/20$, jossa T_{max} on suurimman ratkaisuun vaikuttavan taajuuden värähdysaika. [8]

3.3 Liikkuva kuorma palkilla

Liikkuvan kuorman palkille aiheuttamien dynaamisten vaikutusten tutkiminen on aloitettu jo 1800-luvulla. Frýba on esitellyt 1970-luvulla kirjassaan [10] erilaisia menetelmiä palkin ja liikkuvan kuorman ratkaisuun. Laskentamalleja on monia erilaisia riippuen millä tarkkuudella tuloksia vaaditaan, ja kuinka monimutkaisen laskentamallin on valmis ratkaisemaan. Nykyään tietokoneiden ja FEM-laskennan kehittyessä yhä monimutkaisemmat laskentamallit ovat muuttuneet käyttökelpoisiksi palkin ja liikkuvan kuorman dynaamisen yhteistoiminnan laskemiseen [11].

Ensimmäiset laskentamallit (Kuva 3.5a) eivät ottaneet huomioon palkin tai kuorman massaa. Laskenta ottaa huomioon vain kinemaattiset vaikutukset ja johtaa hyvin epätarkkaan tulokseen. Mikäli oletetaan palkin massan olevan merkityksetön, saadaan kuvan 3.5b laskentamalli. Käytännön rakenteilla palkin massalla on kuitenkin usein merkitystä, jolloin laskentamalli muuttuu epätarkaksi. [8]

	Laskentamalli	Palkin massa	Kuorman massa	Kuorman jousitus	Kuorman hitausmomentti
a					
b			×		
c		×			
d		×	×		
e		×	×	×	
f		×	×	×	×

Kuva 3.5 Liikkuvan kuorman erilaisia laskentamalleja.

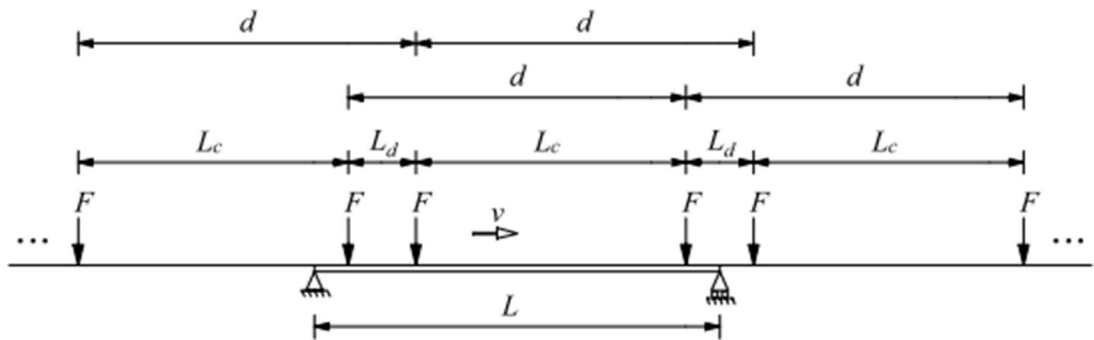
Kun liikkuvan kuorman massa on pieni verrattuna palkin massaan, voidaan kuorman hitausvaikutukset jättää huomioimatta ja saadaan kuvan 3.5c mukainen liikkuvan piste-kuorman laskentamalli. Laskentamalli on yleinen sillan ja liikkuvan ajoneuvon välisen vuorovaikutuksen tutkimiseen. Sillan dynaamiset vaikutukset saadaan melko hyvällä tarkkuudella, mutta laskentamallin heikkoutena on se, ettei ajoneuvon vasteesta saada mitään tietoa. [11]

Tapauksissa, joissa ajoneuvon massaa ei voi pitää pienenä, voidaan ottaa käyttöön liikkuvan massan laskentamalli (Kuva 3.5d). Massa on jatkuvasti kiinni palkissa, minkä vuoksi hyppäysvaikutusta ei ole otettu huomioon. Ajoneuvon jousitusjärjestelmän kimmoisuus- ja vaimennusvaikutukset voidaan ottaa huomioon lisäämällä liikkuvaan massaansa jousi-vaimennussysteemi (Kuva 3.5e). Tällöin todennukaisempien tulosten lisäksi voidaan laskentamallista ratkaista myös liikkuvan ajoneuvon kiihtyvyys pystysuunnassa, jota voidaan käyttää matkustusmukavuuden kriteerinä. [11]

Tehokkaiden tietokoneiden myötä laskentamallista voidaan luoda vieläkin realistisempi (Kuva 3.5f). Esimerkiksi junan runko, teli ja pyörät voidaan esittää jäykkänä rakenteena, jotka ovat kiinnitettyinä toisiinsa jousi-vaimennuselementtien avulla. Näin voidaan ottaa huomioon myös rungon pituuskallistuksesta syntyvä hitausmomentti. Malliin voidaan lisätä myös raiteen pystysuuntaiset epäsäännöllisyydet ja raiteen ja sillan välisen maan jousto. Mallintamalla juna kolmiulotteisena voidaan huomioida myös vaakakallistukset ja raiteiden vaakasuuntaiset epäsäännöllisyydet. Vaikka monimutkaisempi malli tekee simuloinnista realistisemman, se lisää myös laskenta-aikaa. Lisäksi laskentamalli on tällöin työläämpi luoda ja herkempi virheille. [11]

3.3.1 Liikkuva pistekuorma

Yksinkertaisen liikkuvan pistekuorman mallin etuna on se, että laskennassa on helpompi tunnistaa sillan ja kuormituksen ominaisuuksia, jotka vaikuttavat oleellisesti tuloksiin. Tutkitaan tapausta, jossa sarja pistekuormia liikkuu pituuden L mittaisen yksiaukkoisen palkin yli (Kuva 3.6). Pistekuormat edustavat junaliikennettä, jonka vaunun etu- ja takapyörien välinen etäisyys on L_c , ja takapyörien ja seuraavan vaunun etupyörien välinen etäisyys L_d . Vaunun pituus on tällöin $d = L_c + L_d$. Oletuksena on, että sillan pituus ei ole suurempi kuin kahden vaunun pituus, eli $L \leq 2d$.



Kuva 3.6 Yksiaukkoisen palkin yli liikkuva sarja pistekuormia.

Yang *et al.* ovat esittäneet kirjassaan [11] tehtävän analyyttisen ratkaisun. Sillan siirtymävaste on suurimmillaan kun $\sin(\omega_1 d / 2v) = 0$, jolloin syntyy resonanssi-ilmiö. Toisin sanoen kriittinen vaunun pituus on

$$d = 2i \frac{\pi v}{\omega_1}, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3.26)$$

Muuntamalla ominaiskulmataajuus ominaistajuudeksi ja ratkaisemalla yhtälöstä (3.26) nopeus saadaan resonanssinopeudeksi

$$v = \frac{1}{i} d f_1, \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad (3.27)$$

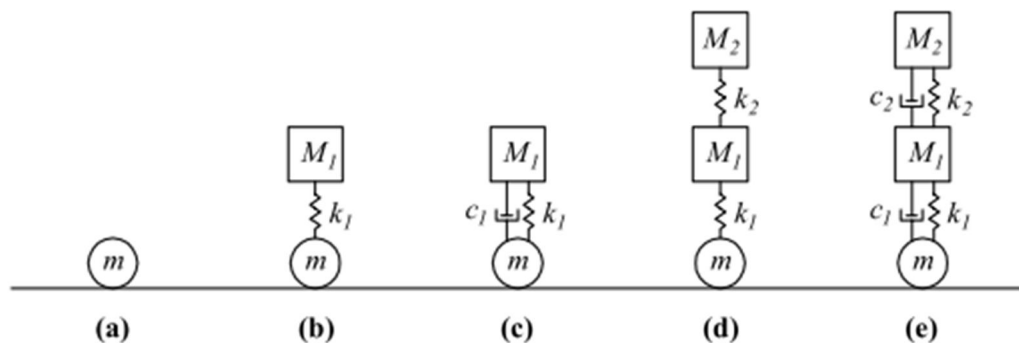
Huomattavaa kuitenkin on, että nopeuden pientyessä myös vaste pienenee huomattavasti, ja oleellisin resonanssinopeus on ensisijainen resonanssinopeus, joka saadaan $i:n$ arvolla 1. Toissijaisten resonanssinopeuksien vasteet ovat tähän verrattuna pieniä, joten ne voidaan yleensä jättää huomioimatta. Siltojen suunnittelussa olisi hyvä siis pyrkiä välttämään tilanteen $v = df_1$ syntyminen. Jos sillalla liikkuva kalusto on vakio, niin silta-suunnittelijan ainoaksi vaihtoehdoksi jää alimman ominaistaajuuden muuttaminen. [11]

4. LASKENTAMENETELMÄT

Sillan yli liikkuva kulkuneuvo voidaan mallintaa vakionopeudella liikkuvana jousi-vaimennus-massasysteeminä. Tässä työssä laskenta suoritetaan käyttäen elementtimenetelmään perustuvaa LUSAS (versio 15) ohjelmaa. Laskentaan käytetään LUSAS ohjelman Moving Mass Analysis -työkalua, joka hyödyntää moodisummausta, sekä suoran integroinnin menetelmää.

4.1 Laskeminen FEM-ohjelmalla

LUSAS ohjelman Moving Mass Analysis -työkalulla voi laskea rakenteen yli liikkuvan jousi-vaimennus-massan aiheuttamat dynaamiset vaikutukset. Ensin määritetään laskennassa käytettävät ominaismuodot, ja kokonaisvaikutukset lasketaan hyödyntäen moodisummausta. Kuormituksena on jokin kuvan 4.1 mukaisista systeemeistä. Systeemejä voi olla useampia, ja näiden väliset etäisyydet voi määrittää vapaasti.



Kuva 4.1 LUSAS ohjelman Moving Mass Analysis -työkalun kuormitusvaihtoehdot.

Laskennassa käytetään seuraavia oletuksia:

- Systeemi on geometrialtaan, materiaaliominaisuuksiltaan ja reunaehdoiltaan lineaarinen.
- Suhteellinen vaimennus on alle 100 %.
- Pyörä ja rakenne ovat jatkuvassa kontaktissa keskenään.
- Vain pystysuuntainen liike huomioidaan jousi-vaimennus-massasysteemille.
- Jousi-vaimennus-massasysteemin massa ei vaikuta rakenteen ominaistaajuuksiin.

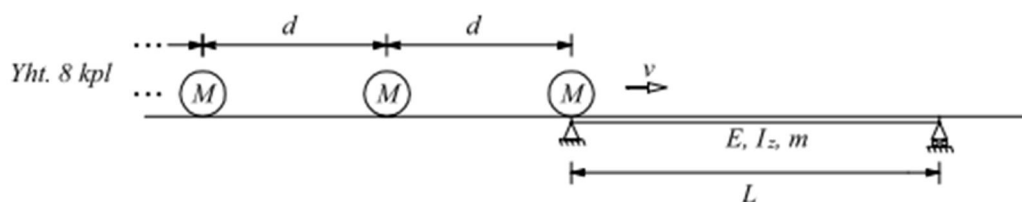
- Laskennan tarkkuus huononee suurilla kuorman massan ja rakenteen massan suhteilla. Suosituksena on, että rakenteeseen aktiivisesti vaikuttavien jousi-vaimennus-massasysteemien kokonaismassa ei saisi ylittää 10 % rakenteen kokonaismassasta minään ajan hetkenä. [13]

Toisena laskentamenetelmänä käytetään suoraa integrointia LUSAS ohjelmalla, jossa käytetään implisiittistä Hilber-Hughes-Taylorin menetelmää. Suoralla integroinnilla ei ole vastaavia rajoituksia kuin moodisummausmenetelmässä. Liikkuvan ajoneuvon voi luoda vapaasti solidielementtejä ja jousi-vaimennuselementtejä käyttäen. Näin pystyy mallintamaan realistisen liikennevälineen jousitusysteemeineen ja jäykkine runkoi-neen. Suoralla integroinnilla tehty laskenta vastaa realistista simulointia, jossa liikenne-välineen ja rakenteen massan suhteella ei ole merkitystä laskennan tarkkuuteen.

Haittapuolena suorassa integroinnissa on kuitenkin laskennan raskaus. Laskenta-ajat ovat moninkertaiset moodisummaukseen verrattuna. Jotta laskentamalli olisi käyttökelpoinen, täytyy siihen tehdä joitain yksinkertaistuksia. Tässä työssä laskenta tehdään kaksikulotteisena ja tutkitaan vain pystysuuntaisia vaikutuksia. Lisäksi laskennan aika-askel täytyy valita huolellisesti, jotta oleelliset tuloksiin vaikuttavat ilmiöt tulevat huomioida laskenta-ajan säilyessä kuitenkin kohtuullisena.

4.2 Menetelmien vertailu

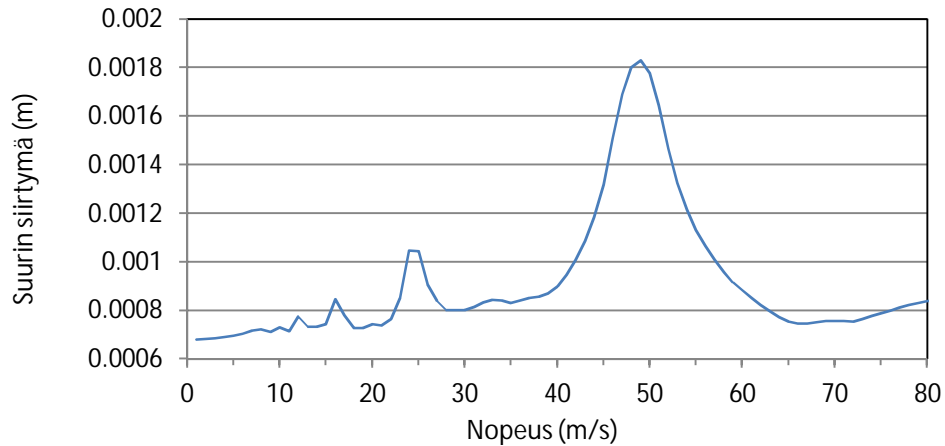
Tutkitaan tapausta, jossa 8 pistemassaa kulkee yksiaukkoisen sillan yli (Kuva 4.2). Pistemassojen massa on $M = 5000$ kg ja keskinäinen etäisyys $d = 10$ m. Sillan ominaisuudet ovat: pituus $L = 20$ m, kimmokerroin $E = 30$ GPa, Poissonin suhde $\nu = 0.2$, poikkeileikkauksen ala $A = 1$ m², neliömomentti $I_z = 0.55$ m⁴, massa metriä kohden $m = 10$ t/m, vaimennuskerroin $\zeta = 2$ % ja sillan alin ominaistajuus $f_1 = 5$ Hz. Ensisijaiseksi resonanssinopeudeksi saadaan kaavalla (3.27) $v_1 = 50$ m/s, ja i :n arvoilla 2, 3 ja 4 saadaan toissijaisiksi resonanssinopeuksiksi $v_2 = 25$ m/s, $v_3 = 16.67$ m/s ja $v_4 = 12.5$ m/s.



Kuva 4.2 Nopeudella v liikkuvat pistemassat yksiaukkoisen sillan yli.

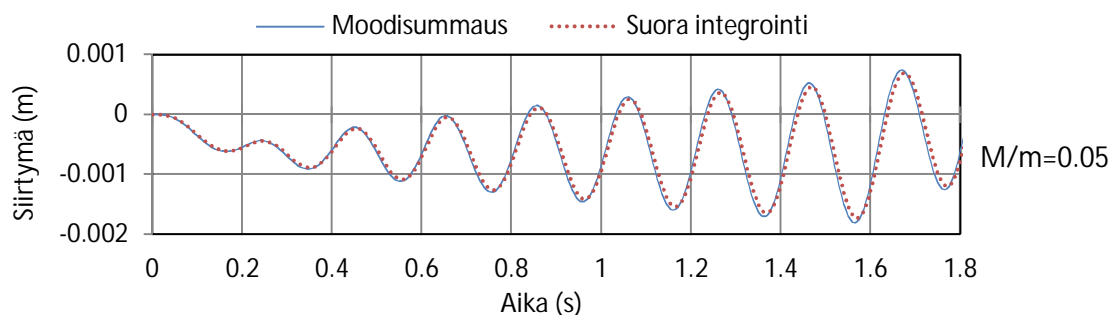
Lasketaan moodisummauksella sillan keskipisteen suurin siirtymä nopeuksilla 1 – 80 m/s. Tuloksista (Kuva 4.3) nähdään, kuinka kaavalla (3.27) saadut resonanssinopeudet vastaavat hyvin laskettuja arvoja. Suurin siirtymä saadaan ensisijaisella resonanssino-

peudella ja toissijaiset resonanssinopeudet on havaittavissa pienenä hyppäyksenä siirtymän arvossa.

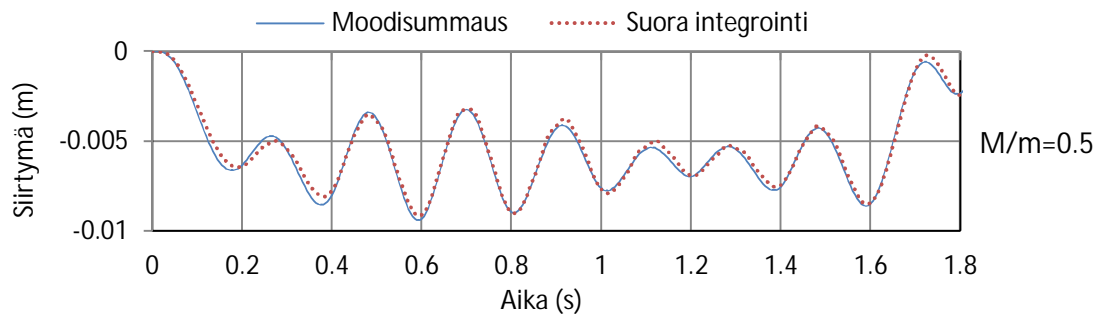


Kuva 4.3 Sillan keskipisteen suurin siirtymä nopeuden funktiona. Kaavalla (3.27) Lasketut resonanssinopeudet $v_1 = 50$ m/s, $v_2 = 25$ m/s, $v_3 = 16.67$ m/s ja $v_4 = 12.5$ m/s.

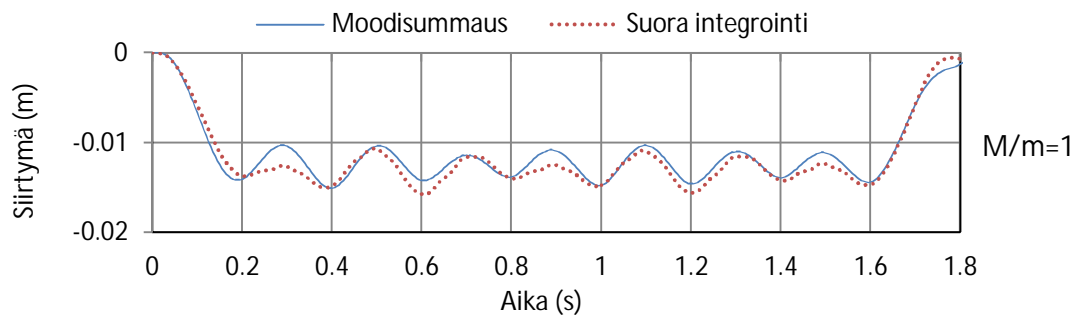
Moodisummausmenetelmän suosituksena on, että rakenteeseen aktiivisesti vaikuttavien kuormien kokonaismassa ei saisi ylittää 10 % rakenteen kokonaismassasta. Tutkitaan miten kuorman massan kasvattaminen vaikuttaa moodisummauksen laskentatarkkuuteen suorittamalla vertailulaskennat suoralla integroinnilla. Laskennassa käytetään edellisen esimerkin arvoja muuttaen pistemassan suuruutta. Koska sillan pituus on 20 metriä ja pistemassojen etäisyys 10 metriä, sillalla vaikuttaa aktiivisesti korkeintaan 2 massaa. Tällöin 5000 kg massoista tulee yhteensä 10000 kg. Sillan kokonaismassa on 200000 kg. Aktiivisesti vaikuttavien massojen suhde sillan massaan on tällöin $0.05 = 5\%$. Lasketaan resonanssinopeudella 50 m/s liikkuvien massojen aiheuttama sillan keskipisteen siirtymävaste kasvattaen massan arvoa. Tulokset on esitetty kuvissa 4.4 - 4.7.



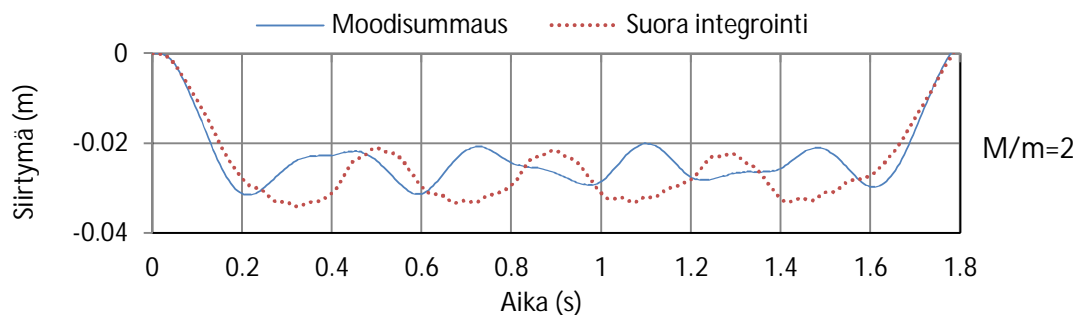
Kuva 4.4 Sillan keskipisteen siirtymävaste kuorman ja sillan massan suhteella 0.05.



Kuva 4.5 Sillan keskipisteen siirtymävaste kuorman ja sillan massan suhteella 0.5.



Kuva 4.6 Sillan keskipisteen siirtymävaste kuorman ja sillan massan suhteella 1.

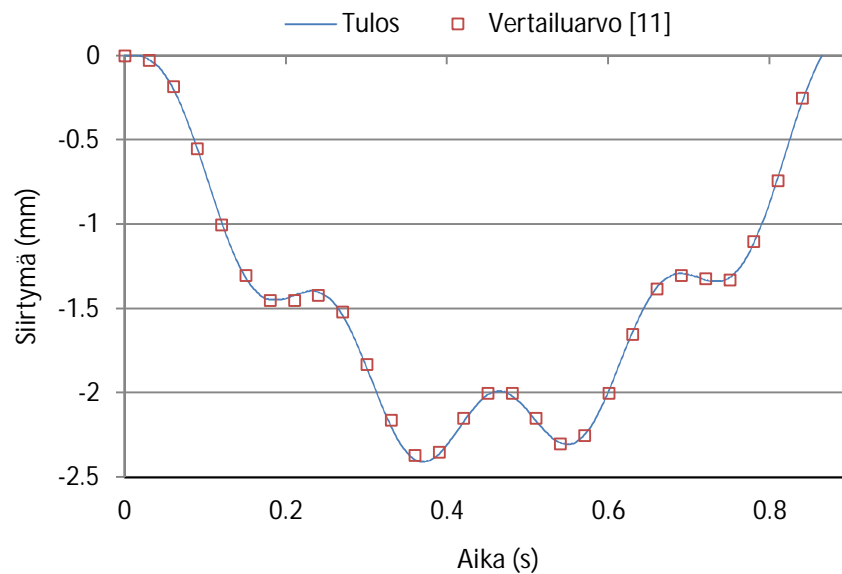


Kuva 4.7 Sillan keskipisteen siirtymävaste kuorman ja sillan massan suhteella 2.

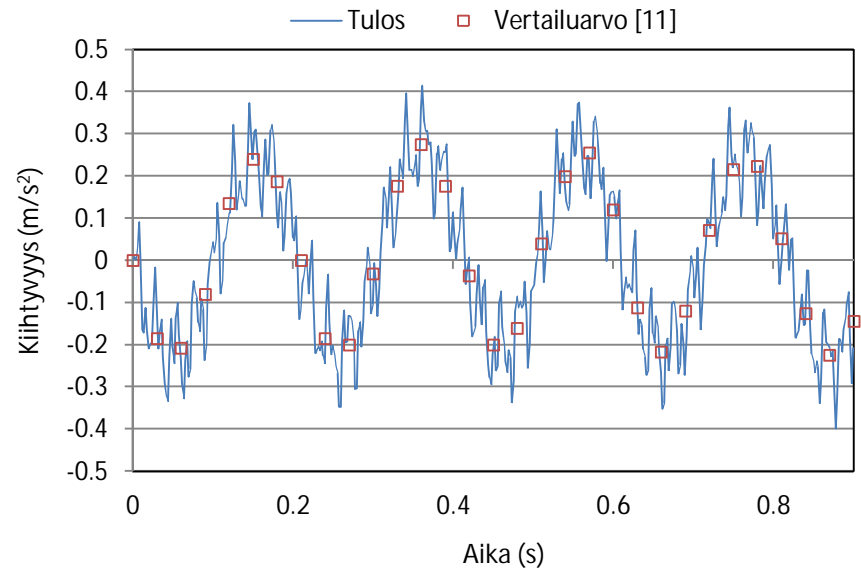
Huomataan, kuinka kuorman ja sillan massan suhteen ollessa alle 0.5 tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Massojen ollessa yhtä suuret voidaan vasteessa havaita jo selkeää eroavaisuutta, vaikka suuruusluokka ja värähtelyn taajuus pysyykin samana. Kuorman massan ollessa kaksinkertainen havaitaan suoralla integroinnilla aaltoliike, jonka taajuus on pienentynyt massan vaikuttaessa sillan taajuuteen. Moodisummauksella saatu vaste eroaa jo melko paljon suoran integroinnin tuloksesta. Laskennan perusteella 10 % vaatimus kuorman ja sillan massan suhteelle vaikuttaisi olevan hyvinkin varmalla puolella. Tulosten mukaan kuorman massan suuruudeksi voisi sallia jopa puolet sillan massasta.

4.3 Laskelmien todentaminen

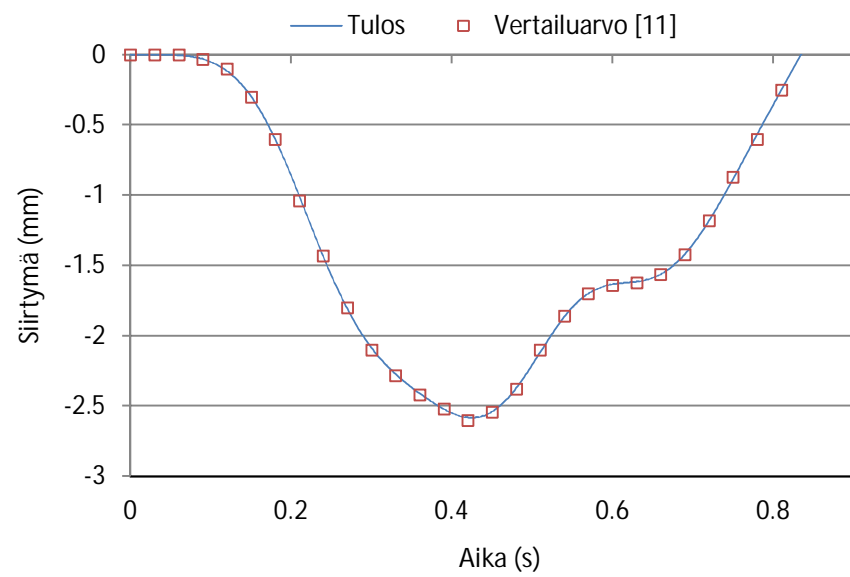
Varmistetaan kehitetyillä laskentamenetelmillä saatujen tulosten oikeellisuus vertaamalla tuloksia aiemmin tehtyihin tutkimuksiin. Yang *et al.* esittävät kirjassaan [11] palkilla liikkuvan jousimassan analyyttisen ja elementtimenetelmällä saadun ratkaisun. Analyytisen ratkaisun tulokset on todettu vastaavan hyvin elementtimenetelmällä saatuja tuloksia. Lähtötietoina ovat: palkin pituus $L = 25$ m, kimmokerroin $E = 2.87$ GPa, Poissonin suhde $\nu = 0.2$, neliömomentti $I_z = 2.90$ m⁴, massa metriä kohden $m = 2303$ kg/m, jousimassan massa $M_v = 5750$ kg, jousen jäykkyys $k_v = 1595$ kN/m ja nopeus $v = 100$ km/h. Alla on esitetty LUSAS ohjelmalla moodisummauksella saadut tulokset sekä vertailuarvona kirjan [11] tutkimustulokset (Kuva 4.8 - 4.11). Tulokset vastaavat hyvin toisiaan.



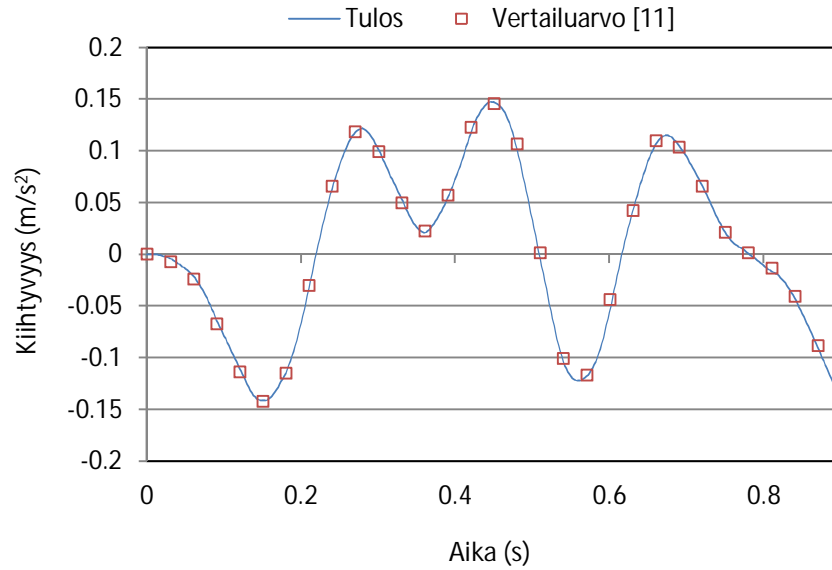
Kuva 4.8 Palkin keskipisteen siirtymä.



Kuva 4.9 Palkin keskipisteen kiihtyvyys.

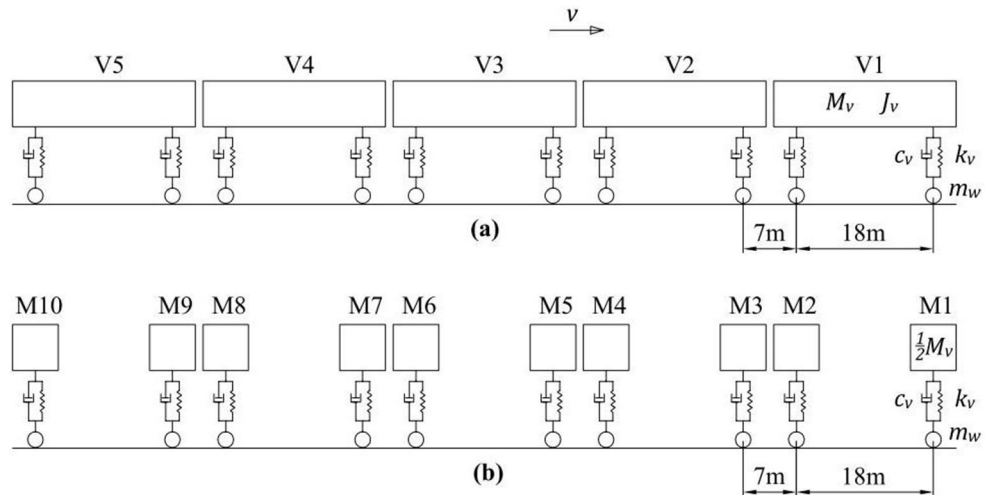


Kuva 4.10 Jousimassan siirtymä.



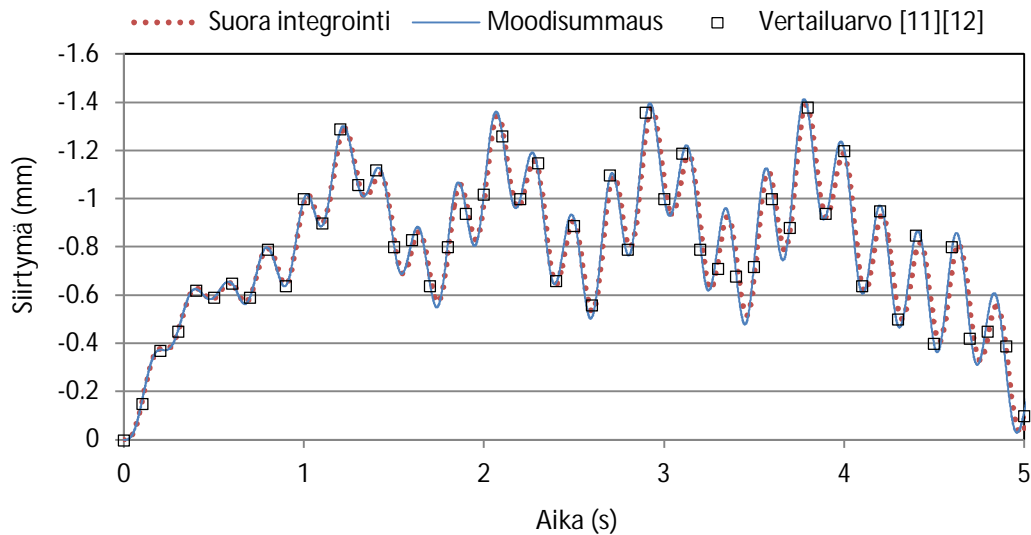
Kuva 4.11 Jousimassan kiihtyvyys.

Lou on tarkastellut tutkimuksessaan [12] viidestä identtisestä vaunusta koostuvan junan liikettä sillalla (Kuva 4.12a). Lähtötiedot ovat samat kuin Yangin *et al.* tutkimuksessa [11]. Vaunun ominaisuudet ovat: massa $M_v = 48$ t, hitausmomentti $J_v = 2500 \text{ tm}^2$, jousituksen jäykkyys $k_v = 1500 \text{ kN/m}$, jousituksen vaimennus $c_v = 85 \text{ kNs/m}$, pyörän massa $m_w = 5$ t. Sillan ominaisuudet ovat: pituus $L = 30$ m, kimmokerroin $E = 29.43 \text{ GPa}$, Poissonin suhde $\nu = 0.2$, poikkileikkauksen ala $A = 7.94 \text{ m}^2$, neliömomentti $I_z = 8.72 \text{ m}^4$, massa metriä kohden $m = 36 \text{ t/m}$ ja vaimennuskerroin $\zeta = 2.5 \%$. Lasketaan tulokset käyttäen suoraa integrointia sekä moodisummausta. Moodisummausta varten yksinkertaistetaan junan laskentamallia jakamalla vaunun massa kahteen pistemassaan (Kuva 4.12b). Yksinkertaistetussa mallissa ei oteta huomioon vaunun pituuskallistuksesta syntyvää hitausmomenttia.



Kuva 4.12 Junan laskentamalli (a) ja yksinkertaistettu malli (b).

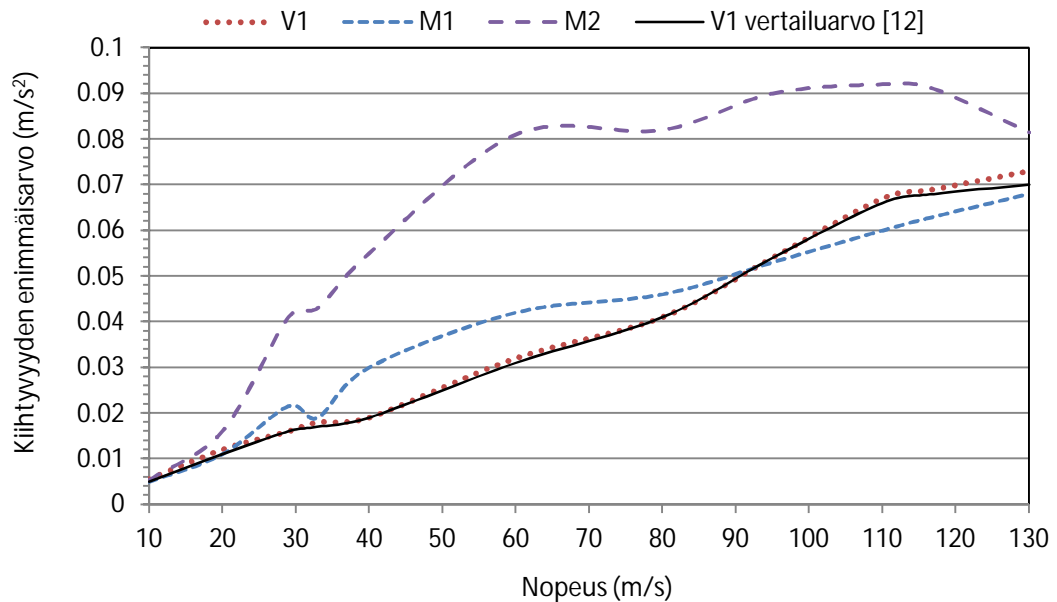
Yang *et al.* ovat laskeneet sillan keskipisteen siirtymän nopeudella $v = 105 \text{ km/h} = 29.17 \text{ m/s}$, ja Lou on toistanut laskennan saaden saman tuloksen. Suoralla integroinnilla ja moodisummauksella saadut tulokset sekä vertailuarvot on esitetty (Kuva 4.13). Huomataan, että moodisummauksesta puuttuva vaunun hitausmomentti ei vaikuta juurikaan sillan siirtymään. Saadut tulokset vastaavat myös vertailuarvoja erittäin hyvin.



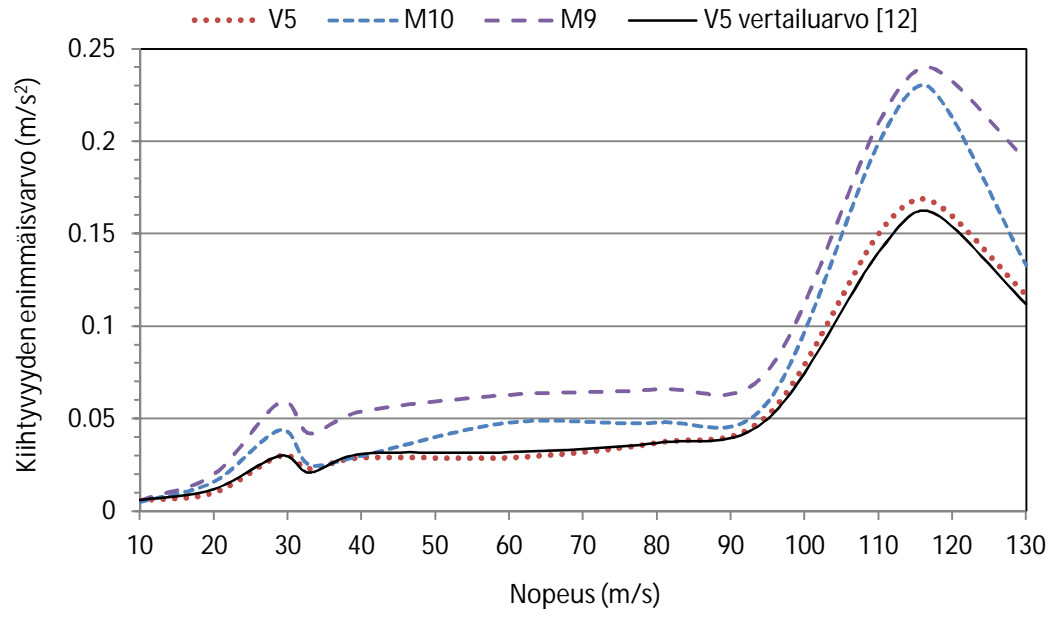
Kuva 4.13 Sillan keskipisteen siirtymä nopeudella $v=29.17 \text{ m/s}$.

Lasketaan vielä vaunun kiihtyvyyden enimmäisarvo eri nopeuden arvoilla. Mittauskohtina käytetään suorassa integroinnissa ensimmäisen ja viimeisen vaunun keskipisteitä, joita on merkitty lyhenteillä V1 ja V5, sekä moodisummauksessa ensimmäisen vaunun jaetut massat M1 ja M2, sekä viimeisen vaunun jaetut massat M9 ja M10. Saadut tulokset

set ja vaunujen keskipisteiden kiihtyvyyksien vertailuarvot on esitetty (Kuva 4.14 ja Kuva 4.15). Nähdään, kuinka vaunujen keskipisteiden kiihtyvyydet vastaavat hyvin vertailuarvoa. Pientä satunnaista eroavaisuutta syntyy, mikä saattaa johtua vertailuarvon laskentamenetelmän erilaisuudesta, sillä Lou on käyttänyt moodisummausta laskennassaan. Vaunun jaettujen massojen kiihtyvyydet ovat keskimäärin suurempia kuin vertailuarvot, joka selittyy vaunun hitausmomentin puuttumisella. Ainoastaan ensimmäisen massan kiihtyvyys lähellä resonanssinopeutta on pienempi kuin vaunumallilla saatu tulos. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että ensimmäinen massa poistuu sillalta jo ennen kuin resonanssi-ilmiö vaikuttaa sillan vasteeseen. Jaetuista massoista ensimmäinen massa M1 näyttäisi kuvaavan paremmin ensimmäisen vaunun kiihtyvyyttä kuin massa M2. Sama tilanne on myös viimeisessä vaunussa, jossa M10 on lähempänä vaunun tuloksia kuin M9.



Kuva 4.14 Ensimmäisen vaunun kiihtyvyyden enimmäisarvo eri nopeuksilla.



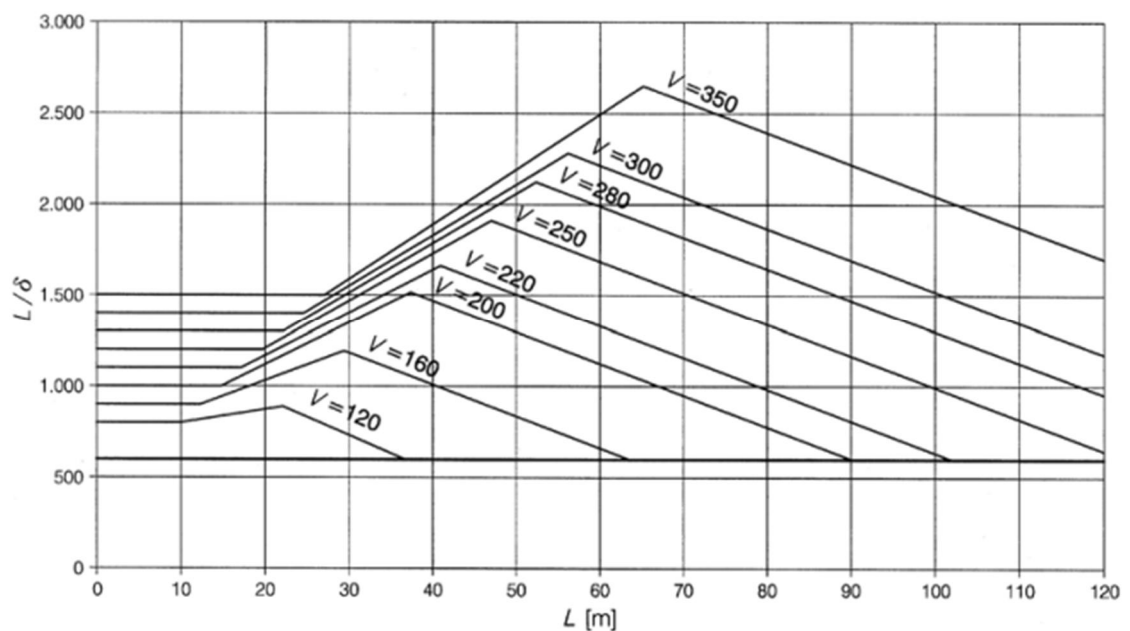
Kuva 4.15 Viimeisen vaunun kiihtyvyyden enimmäisarvo eri nopeuksilla.

5. SILLAN JA RAITIOVAUNUN DYNAAMINEN YHTEISTOIMINTA

Eurokoodissa on esitetty ohjeet dynaamisen analyysin suorittamiseen junaliikenteen kuormittamille rautatiesilloille. Raitiovaunuliikenteellä on kuitenkin junaliikennettä kevyempi kalusto, lyhyemmät akselivälit ja pienemmät nopeudet. Tässä luvussa tutkitaan sillan ominaisuuksia, jolloin raitiovaunuliikenteen aiheuttamat kiihtyvyydet jäävät epämukavuuden raja-arvoja pienemmiksi ja tätä kautta eurokoodin ohjeiden soveltuvuutta raitiovaunuliikenteelle.

5.1 Rautatiesiltojen dynaaminen analyysi eurokoodissa

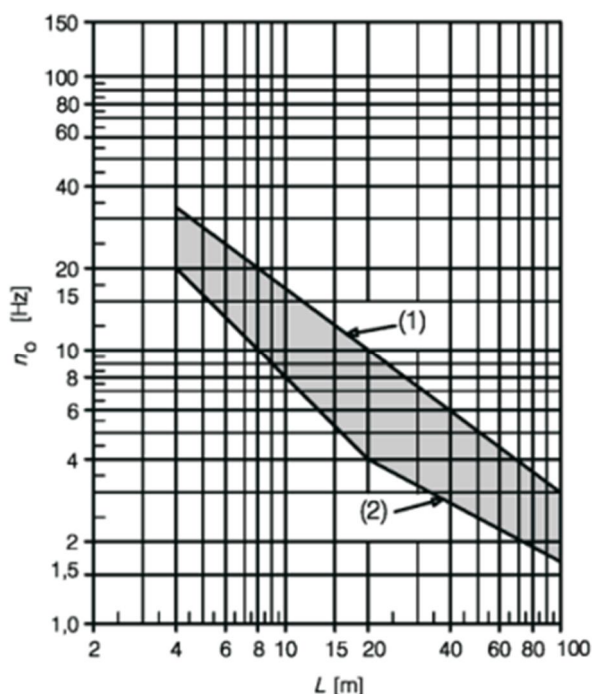
Eurokoodissa on esitetty rautatiesilloille ominaisuuksia jolloin vaunun suurin pystykiihtyvyys pysyy alle 1 m/s^2 , jota voidaan eurokoodin mukaan pitää erittäin hyvän matkustajamukavuuden tuottavana (Kuva 5.1). Muuttujina on annettu sillan jännemitta, junan nopeus sekä taipuma kuormakaaviosta 71. Taipuma on esitetty jännemitan ja taipuman suhteena L/δ . Kuormakaavio 71 koostuu neljästä 1.6 metrin välein sijaitsevasta 250 kN pistekuormasta, sekä näiden ulkopuolella vaikuttavasta 80 kN/m tasaisesta kuormasta. Kuormakaaviota kerrotaan dynaamisella suurennuskertoimella Φ , jonka määrittäminen on esitetty eurokoodissa. [5]



Kuva 5.1 Rautatiesiltojen suurin sallittu taipuma junaliikenteestä jännemitan ja junan nopeuden (km/h) funktiona. [5]

Kuvan 5.1 taipuman raja-arvot on määritetty rautatiesilloille, joissa on kolme tai useampia peräkkäisiä vapaasti tuettuja jäniteitä. Yksi- ja kaksiaukkoiselle sillalle kerrotaan raja-arvot luvulla 0.7, ja jatkuvalle sillalle, jossa on kolme tai useampia jäniteitä, luvulla 0.9. Pienin taipuman raja-arvo on kaikilla silloilla $L/\delta = 600$. [5]

Mukavuuskriteerien lisäksi eurokoodissa on esitetty vaatimukset, joiden perusteella valitaan tarvitseeko suorittaa dynaaminen analyysi. Mikäli junan nopeus sillalla on pienempi kuin 200 km/h sekä silta on jatkuva ja toteuttaa kuvan 5.1 vaatimukset, dynaamista analyysiä ei edellytetä. Vapaasti tuetun rakenteen tapauksessa tutkitaan onko sillan alin ominaistajuuus n_0 kuvan 5.2 tummennetun alueen rajoissa, jolloin dynaamista analyysiä ei tarvita. Mikäli alaraja alittuu, tutkitaan vielä taulukoita, joissa on muuttujina sillan jännemitta, alin ominaistajuuus, sillan massa ja junan nopeus. Taulukoiden perusteella voidaan mahdollisesti todeta dynaaminen analyysi tarpeettomaksi. [14]

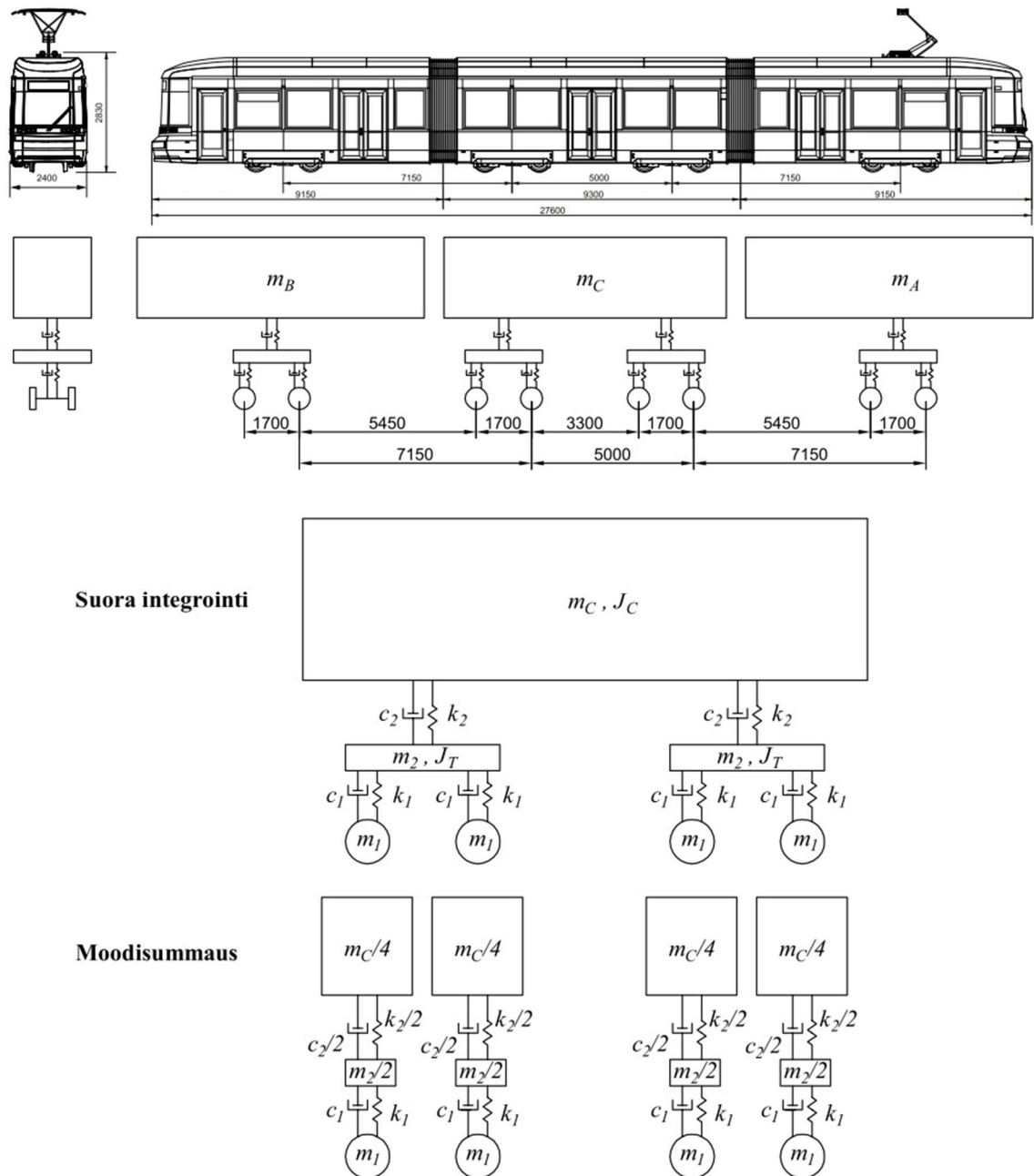


Kuva 5.2 Sillan ominaistajuuden n_0 rajat jännemittan L funktiona. [14]

5.2 Raitiovaunumalli

Helsingin kaupungin raitiovaunukalusto koostuu tällä hetkellä suurimmalta osin 70- ja 80-luvulla valmistetuista nivelraitiovaunuista, joita on noin 80 kappaletta, sekä 2000-luvun alkupuolen matalalattiavaunuista, joita on 40 kappaletta. Uusimpia Artic-raitiovaunuja valmistetaan vuosien 2015-2018 aikana 40 kappaletta, joista kaksi on jo tällä hetkellä matkustajaliikenteessä [15]. Tässä työssä raitiovaunumallina käytetään Artic-raitiovaunun ominaisuuksia. Artic-raitiovaunu on käytössä olevista vaunuista painavin ja edustanee parhaiten tulevaisuudessa käytettäviä vaunuja vanhojen mallien jäädessä pois liikenteestä.

Raitiovaunu yksinkertaistetaan laskentamalliin vaunuista, teleistä ja pyöräseteistä koostuvaksi systeemiksi, jossa jousitusjärjestelmä määritetään lineaarisilla jousi-vaimennus elementeillä (Kuva 5.3). Raitiovaunun valmistajalta saatujen teknisten tietojen perusteella on arvioitu laskentamallin suureille numeroarvot (Taulukko 5.1). Vaunujen massat on laskettu täydellä kuormalla (AW3), ja vaunujen välinen kiinnitys on oletettu täysin joustavaksi. Jousitusjärjestelmä on yksinkertaistettu kaksikulotteisen tapauksen pysyvuusvaikutusten tutkimiseen.



Kuva 5.3 Raitiovaunun laskentamalli.

Taulukko 5.1 Raitiovaunun ominaisuudet.

Pyöräsetin massa	m_1	785 kg
Telin massa	m_2	2540 kg
Vaunun A massa	m_A	12010 kg
Vaunun B massa	m_B	11090 kg
Vaunun C massa	m_C	20200 kg
Ensiöjousitus jäykkyys	k_1	2.4E6 N/m
Ensiöjousitus vaimennus	c_1	7.2E3 Ns/m
Toisiojousitus jäykkyys	k_2	1.8E6 N/m
Toisiojousitus vaimennus	c_2	7.0E4 Ns/m
Vaunun C hitausmomentti	J_C	120000 kgm ²
Telin hitausmomentti	J_T	1100 kgm ²

5.3 Tutkimustulokset

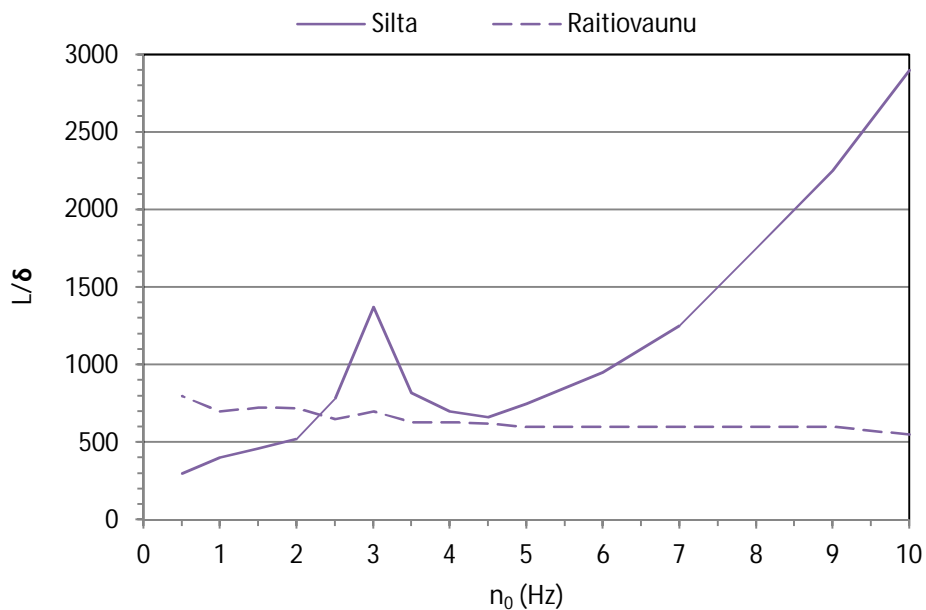
Tutkitaan kehitetyillä laskentamenetelmillä raitiovaunun aiheuttamia kiihtyvyyksiä sillalla. Raitiovaunun enimmäisnopeutena käytetään 20 m/s = 72 km/h. Eurokoodissa [14] on annettu dynaamisessa analyysissä käytettävän sillan vaimennuksen alaraja-arvoja riippuen sillan materiaalista. Yli 20 metrin sillalle teräs- ja liittorakenteelle vaimennuksen alaraja-arvo on 0.5 %, esijännitetyille betonille 1 % ja teräsbetonille ja teräspalkkibetonille 1.5 %. Tässä tutkimuksessa käytetään vaimennukselle arvoa 1 %. Tutkitaan yksiaukkoista ja jatkuvaa siltarakennetta muuttamalla sillan jännemittaa, massaa ja jäykkyyttä. Lasketaan sillan taipuma raitiovaunun kuormasta, jonka suuruutena käytetään tasaista kuormaa 30 kN/m kerrottuna dynaamisella suurennuskertoimella Φ . Tutkitaan, millä taipuman arvoilla sillan suurin kiihtyvyys ylittää arvon 0.7 m/s² tai vaunun kiihtyvyys ylittää standardin ISO 2631 menetelmällä raja-arvon 0.315 m/s², joka edustaa ”ei epämukavaa” matkustusmukavuustasoa.

5.3.1 Yksiaukkoinen silta

Siltarakenteena tutkitaan yksiaukkoista siltaa, jonka jännemittaa vaihdellaan 15 – 40 metriin viiden metrin välein ja alinta ominaistaajuutta välillä 0.5 – 10 Hz. Alle 5 Hz ominaistaajuuksilla laskentavälinä on 0.5 Hz ja yli 5 Hz ominaistaajuuksilla 1 Hz. Raitiovaunun nopeutta vaihdellaan 0.5 m/s välein nopeusalueella 10 – 20 m/s. Lisäksi lasketaan tulokset myös 100 metrin jännemitalla, jotta saadaan käsitys myös suurempien jännemittojen käyttäytymisestä. Laskenta suoritettiin moodisummausmenetelmällä ja tarkistuslaskenta tehtiin suoralla integroinnilla 20 metrin jännemitalla. Huomattiin, että sillan kiihtyvyyden arvoiksi saatiin samat molemmilla laskentamenetelmillä laskennan tarkkuuden rajoissa. Moodisummaus yliarvioi hieman vaunun kiihtyvyyden arvot varsinkin keskimmäisen vaunun osalta. Tämä johtuu siitä, että moodisummauksessa jokai-

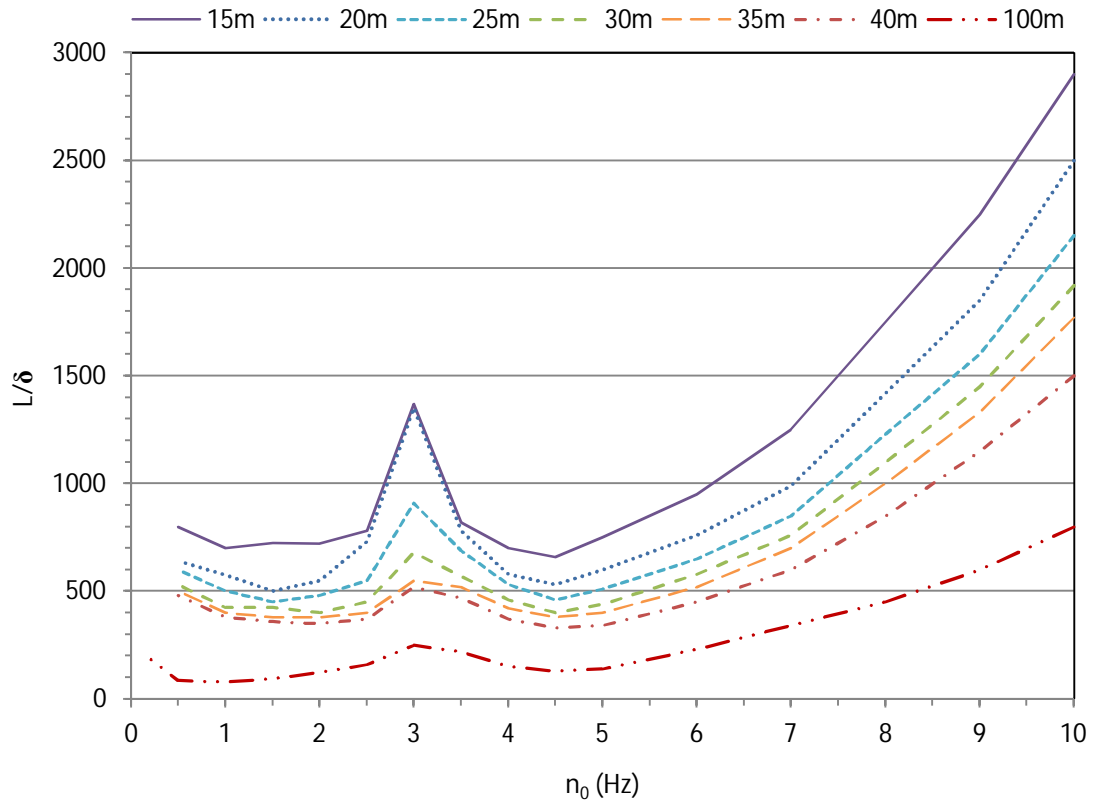
nen akseli toimii omana systeeminään eikä telin tai keskimmäisen vainun pituuskallistuksesta syntyvää hitausmomenttia oteta huomioon.

Kuvassa 5.4 on esitetty 15 metrin jännemitalla saadut tulokset. Vaaka-akselilla on sillan alin ominaistajuus n_0 ja pystyakselilla sillan jännemitta L jaettuna taipumalla raitiovaunukuormasta δ . Kuvaan on piirretty raja-arvokäyrät, joissa sillan ja raitiovaunun mukavuuskriteerien kiihtyvyydet ylittyvät. Laskennassa sillan kiihtyvyys osoittautui määrääväksi alueella 2.5 – 10 Hz vaunun kiihtyvyyden ollessa määrävä pienemmillä ominaistajuuksilla. Myös muilla jännemitoilla sillan kiihtyvyys osoittautui määräväksi yli 2.5 Hz taajuuksilla.



Kuva 5.4 Yksiaukkoisen sillan suurin sallittu taipuma δ raitiovaunuliikenteestä sillan alimman ominaistajuuden n_0 funktiona 15 metrin jännemitalla.

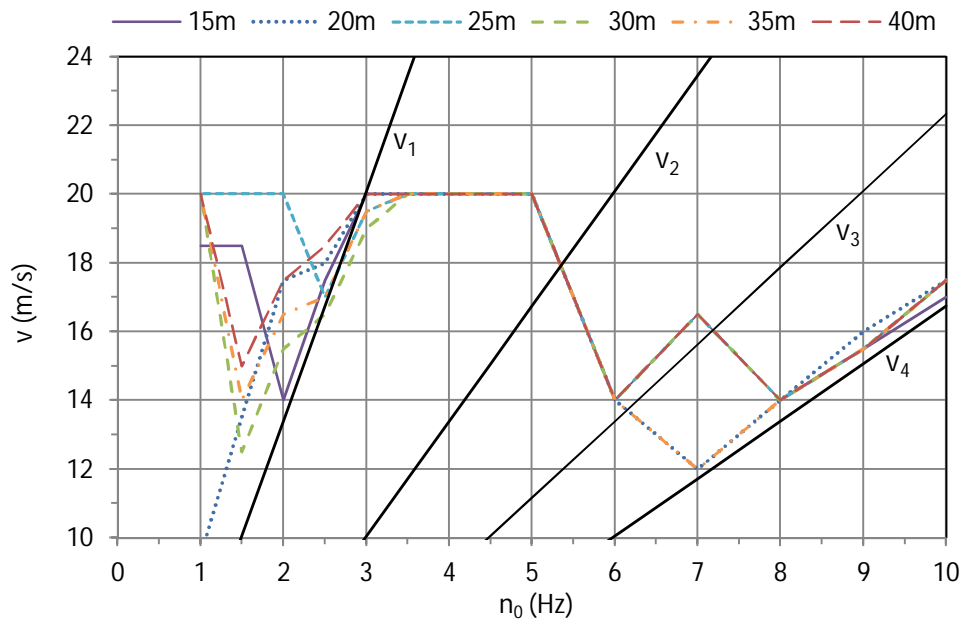
Kaikkien laskettujen jännemittojen tulokset on esitetty kuvassa 5.5. Jokaisesta jännemittasta on piirretty oma raja-arvokäyrä, jossa sillan tai raitiovaunun epämukavuuden kiihtyvyyksiraja ylittyy. Kaikilla jännemitoilla taipuman raja-arvo käyttäytyy samalla tavalla. Arvo L/δ on pienimmillään sillan ominaistajuuden suuruuksilla 1 – 2 Hz ja 4 – 5 Hz, ja kolmen hertsin kohdalla arvo hyppää suuremmaksi. Viidestä hertsistä ylöspäin arvo kasvaa eksponentiaalisesti. Nähdään myös, että arvo L/δ on aina suurempi lyhyemmällä jännemitoilla.



Kuva 5.5 Yksiaukkoisen sillan suurin sallittu taipuma δ raitiovaunuliikenteestä sillan alimman ominaistajuuden n_0 funktiona eri jännemitoilla.

Kuvan 5.5 perusteella näyttäisi siltä, että raitiovaunu synnyttää resonanssi-ilmion 3 Hz alimmalla ominaistajuudella. Sijoittamalla $v = 20$ m/s ja $f_1 = 3$ Hz kaavaan (3.27) saadaan ensisijaisen resonanssin synnyttäväksi akseliväliksi $d = 6.7$ m. Artic-raitiovaunun telien väliset etäisyydet ovat keskiosassa 5 m ja keskiosasta päätyosaan 7.15 m, joten laskettu d osuu siis näiden väliin.

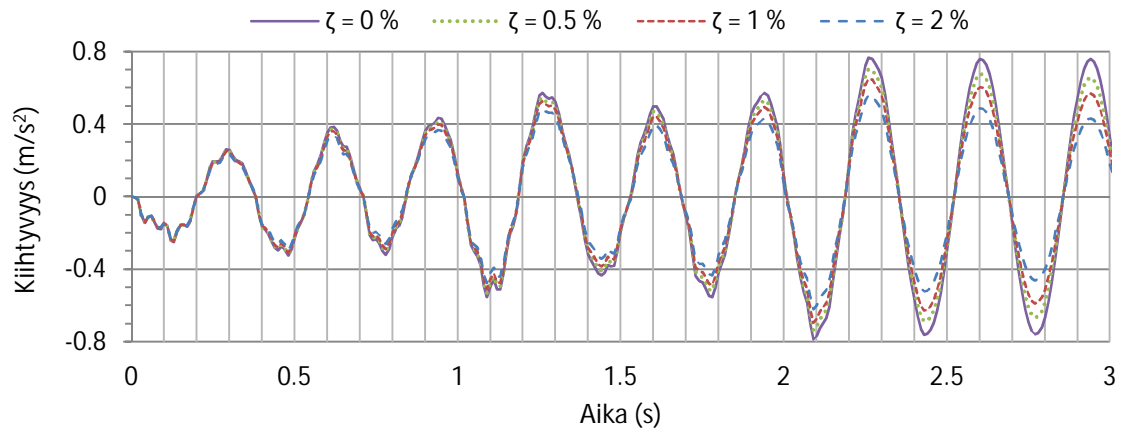
Kuvassa 5.6 on esitetty sillan 15 – 40 metrin jännemitan tuloksien määräävät nopeudet ja akselivälillä 6.7 metriä lasketut resonanssinopeudet taajuuden funktiona. Yli 8 Hz taajuuksilla resonanssinopeus v_4 näyttäisi herättävän suurimmat kiihtyvyydet. Seitsemän hertsin taajuudella joillain jännemitoilla määräävä nopeus on v_4 ja joillain v_3 . Kolmesta viiteen hertsin määräävä nopeus on maksiminopeus $v = 20$ m/s. Alle 3 Hz taajuudella jännemittojen määräävät nopeudet vaihtelevat melko paljon, mutta nopeuden lasku muokaa ensisijaisen resonanssinopeuden v_1 muodostamaa viivaa. Määräävät nopeudet eivät täysin vastaa kaavalla (3.27) laskettuja resonanssinopeuksia, mikä johtuu luultavammin siitä, että kaavassa akseliväli on oletettu suuremmaksi. Kaavan oletuksena on, että sillan pituus ei ole suurempi kuin akseliväli, eli $L \leq 2d$. Raitiovaunun tapauksessa lasketuilla jännemitoilla oletus ei ole voimassa. Lisäksi raitiovaunun akseliväli vaihtelee keskiosasta päätyosaan.



Kuva 5.6 Sillan tulosten määräävät nopeudet ja akselivälin 6.7 m resonanssinopeudet.

Kuvasta 5.6 voidaan päätellä syy sillan tuloksien käyttäytymiseen taajuusalueella 2 – 5 Hz. Viidestä hertsistä kohti kolmea hertsi taipumakriteeri L/δ nousee, koska raitiovaunun kulkiessa maksiminopeudella 20 m/s lähennytään ensisijaista resonanssinopeutta. Kolmesta hertsistä alaspäin ensisijaisen resonanssin synnyttämä nopeus laskee ja tätä myötä myös dynaamiset vaikutukset pienenevät. Yli viiden hertsin taipumakriteerin eksponentiaalinen nousu voidaan selittää sillä, että samalla kiihtyvyydellä värähtelevän rakenteen siirtymät pienenevät, kun värähtelyn taajuus muuttuu suuremmaksi. Näin ollen kiihtyvyyden raja-arvo 0.7 m/s^2 syntyy korkeammilla taajuuksilla pienemmillä siirtymillä.

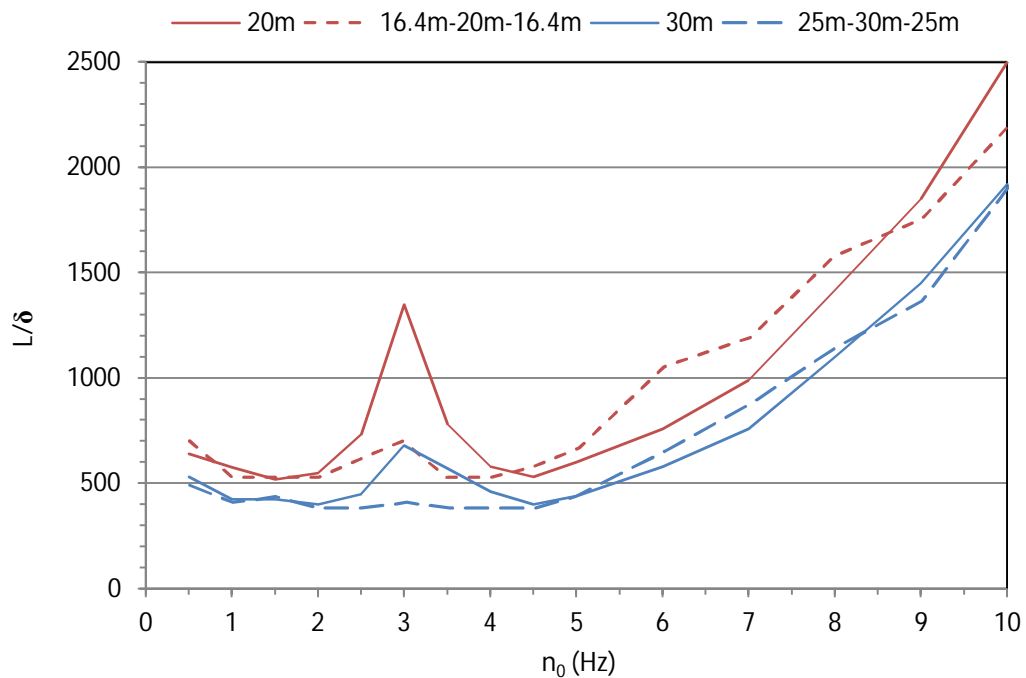
Laskennassa sillan vaimennuksena käytettiin arvoa 1 %. Tutkitaan, miten tulokset muuttuvat kun vaimennuksen arvoa muutetaan. Kuvassa 5.7 on näytetty 20 metrin jänne- ja kolmen hertsin alimman ominaistaajuuden raja-arvotapaus, jolloin syntyy resonanssi-ilmiö. Nähdään, kuinka eri vaimennuksen arvoilla saatujen tulosten ero kasvaa siihen asti kunnes raitiovaunu poistuu sillalta ajanhetkellä $t = 2.05 \text{ s}$. Kuitenkin maksimi- ja miinimiarvot eroavat melko vähän. Esimerkiksi 1 % vaimennuksella maksimi- ja miinimiarvot ovat 0.694 m/s^2 ja 0.5 m/s^2 ja 0.5 % vaimennuksella 0.737 m/s^2 ja 0.5 m/s^2 . Tämä selittyy sillä, että raitiovaunulla on vain muutama akseli, jotka vaikuttavat lyhyen aikaa sillalla. Mikäli samanlaisia vaunuja olisi useampia peräkkäin, raitiovaunun synnyttämä heräte vaikuttaisi pidempään ja vaimennuksen vaikutus olisi suurempi.



Kuva 5.7 Vaimennuksen vaikutus sillan kiihtyvyyteen 20 metrin jännemitalla 3 Hz alimmalla ominaistajuuudella.

5.3.2 Jatkuva silta

Tutkitaan kahden jatkuvan siltarakenteen tapaus vastaavalla menetelmällä. Tutkittavat rakenteet ovat kolmiaukkoisia jatkuvia palkkeja joiden jännemitat ovat 16.4m-20m-16.4m ja 25m-30m-25m. Sillan kiihtyvyys mitataan keskimmäisen jänteen keskikohdasta. Taipuma on määritelty asettamalla raitiovaunukuorma keskimmäiselle jänteelle. Saadut tulokset ja yksiaukkoisen sillan vertailutulokset on esitetty kuvassa 5.8.



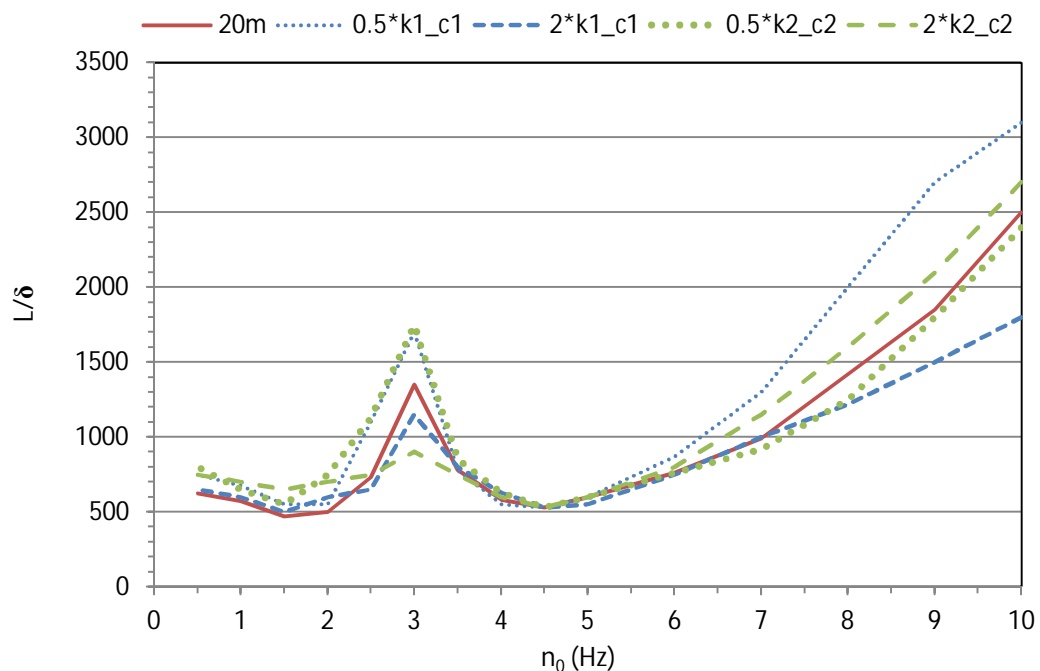
Kuva 5.8 Jatkuvan ja yksiaukkoisen sillan vertailutulokset.

Nähdään, kuinka jatkuvan sillan tulokset ovat suuruusluokaltaan samoja vastaavan jännemitan yksiaukkoisen sillan kanssa. Jatkuvassa sillassa ei ole havaittavissa kolmen hertsin ominaistajuuden kohdalla arvon L/δ selkeää hyppäystä suuremmaksi kuten yksiaukkoisessa tapauksessa. Lisäksi ominaistajuuden alueella 5 – 8 Hz jatkuvan sillan L/δ arvo on hieman suurempi kuin yksiaukkoisen sillan.

5.3.3 Jousitusjärjestelmän vaikutus tuloksiin

Tulokset on laskettu käyttäen Artic-raitiovaunun ominaisuuksia. Jousituksen laskentamalli on yksinkertaistettu monimutkaisemmasta jousitusjärjestelmästä ja jäykkyyksien numeroarvot ovat arvioita, jotka eivät välttämättä täysin vastaa todellista tilannetta. Lisäksi vanhemmissa raitiovaunuissa jousitusjärjestelmä ei ole aivan samanlainen kuin uusissa Artic-vaunuissa. Tutkitaan, kuinka paljon tulokset muuttuvat kun jousituksen arvoja muutetaan.

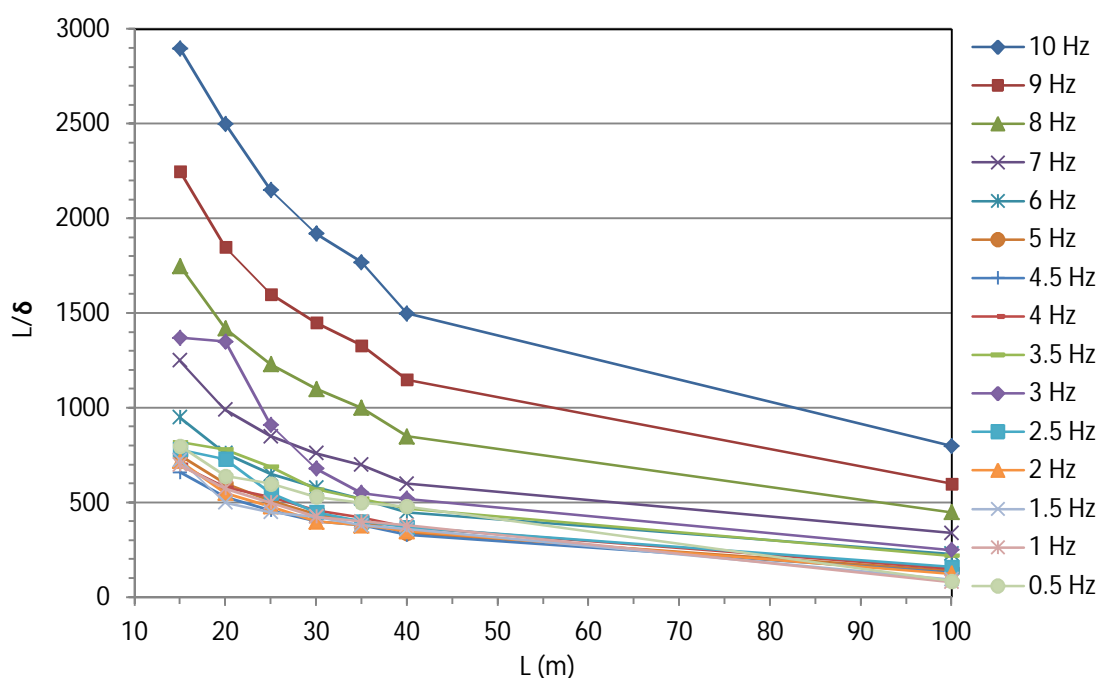
Lasketaan yksiaukkoisen 20 metrin jännevälön tulokset kertomalla ensiö- ja toisiojousituksen jäykkyyttä ja vaimennusta kertoimilla 0.5 ja 2. Saadut tulokset on esitetty kuvassa 5.9. Nähdään, että ensiöjousituksen puolittamisella on epäedullisin vaikutus tuloksiin. Tällöin ominaistajuuden alueilla 2 – 3 Hz ja 6 – 10 Hz arvo L/δ suurenee selkeästi. Myös toisiojousituksen puolittamisella L/δ suurenee alueella 2 – 3 Hz yhtä paljon. Kuitenkin jousitusta muuttamalla raja-arvokäyrä pysyy samanmuotoisena ja tulokset ovat samaa suuruusluokkaa. Erityisesti ominaistajuuden alueella 3.5 – 6 Hz vaikutus tuloksiin on hyvin pientä.



Kuva 5.9 Jousitusjärjestelmän muutoksen vaikutus tuloksiin.

5.4 Tulosten analysointi

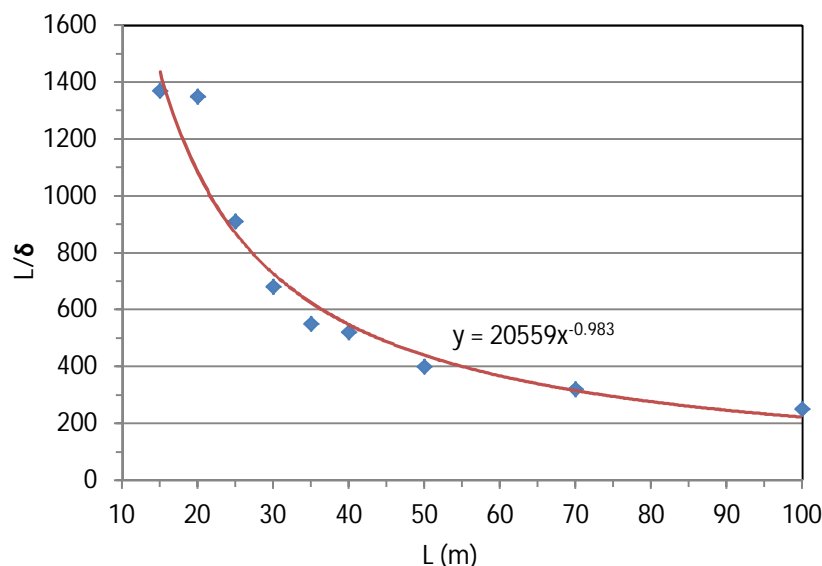
Yksiaukkoisen sillan tulokset voidaan esittää myös sillan pituuden funktiona, jolloin jokaisesta lasketusta taajuudesta voidaan piirtää oma raja-arvokäyrä (Kuva 5.10). Kuvausta voidaan nähdä, kuinka sillan pituuden kasvaessa vaadittava taipumakriteeri pienenee. Korkeammilla taajuuksilla arvot ovat huomattavasti suurempia ja matalampien taajuuksien arvot keskittyvät samalle alueelle.



Kuva 5.10 Yksiaukkoisen sillan tulokset sillan pituuden funktiona.

Eurokoodin kevyen liikenteen mukavuuskriteerin 0.7 m/s^2 toteutuminen osoitetaan, jos kannen alin ominaistaajuus on alle 5 Hz pystysuuntaisessa värähtelyssä. Tämän perusteella voidaan tuloksista suodattaa 5 Hz suuremmat taajuudet pois. Tämä on perusteltua myös siksi, että ylempien taajuuksien raja-arvotapausten rakenteet ovat käytännön siltarakenteiksi liian kevyitä. Kun tutkitaan yli 5 Hz raja-arvotapausten arvoja, huomataan että massa metriä kohden on tutkituilla tapauksilla alle 2500 kg/m. Tästä voidaan päätellä, että 5 – 10 Hz alueella eivät kiihtyvyyssrajat ylitä käytännön siltarakenteilla, sillä massaa lisättäessä alimman ominaistaajuuden pysyessä samana myös sillan jäykkyys kasvaa.

Suodatetaan kuvan 5.8 tuloksista yli 5 Hz taajuudet pois. Lasketaan lisäksi 50 metrin ja 70 metrin tulokset, jotta saadaan käsitys arvojen muuttumisesta 40 metrin ja 100 metrin välillä. Jokaiselta jännevaliltä otetaan maksimiarvo, ja näiden perusteella piirretään käyrä, jota voidaan pitää taipumakriteerin raja-arvona (Kuva 5.11). Käyrän yhtälöksi saadaan $L/\delta = 20559L^{-0.983}$.



Kuva 5.11 Suodatetut tulokset sillan pituuden funktiona.

Raja-arvokäyrä laskee jännemitan kasvaessa. Tämä johtuu siitä, että taipuma on laskettu 30 kN/m tasaiselle kuormalle kerrottuna suurennuskertoimella Φ koko sillan matkalta. Jännemitalta 100 metrin sillalle tämä tarkoittaa yhteensä 3000 kN kuormaa. Lasketun Artic-raitiovaunun kokonaiskuorma on kuitenkin vain 586 kN, joka vaikuttaa 21 metrin matkalla. Näin ollen pitkän jännemitan sillalla koko sillalla vaikuttava tasainen raitiovaunu kuorma yliarvioi raitiovaunun vaikutukset.

Kun tutkitaan eurokoodin rautatieliikenteen matkustusmukavuuden taipumakriteerikuva (Kuva 5.1) ja raitiovaunuliikenteelle määritettyä vastaavaa kuvaajaa (Kuva 5.11), nähdään joitain yhtäläisyyksiä. Molemmissa on selkeä nousu lyhyempiin jännemittoihin siirtyessä. Raitiovaunuliikenteen tuloksissa ei kuitenkaan näy huippuarvoa, vaan taipumakriteeri jatkaa kasvuaan jännemitan pienentyessä. Nähdään myös, kuinka pitkällä jännemitoilla raitiovaunuliikenteelle voidaan sallia suurempia siirtymiä kuin eurokoodin minimi taipumakriteeri $L/\delta = 600$.

Eurokoodissa taajuusalue, jolla ei tarvitse suorittaa dynaamista analyysiä, siirtyi pienemmille ominaistaajuuksille jännemitan kasvaessa (Kuva 5.2). Raitiovaunuliikenteelle lasketuista tuloksista ei näy vastaavaa ilmiötä (Kuva 5.5). Jännemitasta riippumatta 3 Hz ominaistaajuudella taipumakriteerin arvo hyppää suuremmaksi ja 4.5 Hz kohdalla arvo on pienimmillään. Tämä johtuu luultavammin raitiovaunun akselivälistä, joka syn-

nyttää resonanssi-ilmiön vahvimmillaan aina kolmen hertsin taajuudella 20 m/s nopeudella.

Tuloksista nähdään, että eurokoodin raitatiesilloille määritettyjä dynaamisen analyysin ohjeita ei voi suoraan soveltaa raitiovaunuliikenteen kuormittamille silloille. Tämä oli odotettavissa oleva tulos, sillä eurokoodin rautatiesiltoja koskevan luvun alussa mainitaan, että ohjeita ei sovelleta sellaisten kuormien tarkasteluun, joiden aiheuttajina ovat raitiotiet ja muut kevyen raideliikenteen radat [14].

5.5 Yhteenveto

Luvussa tutkittiin millaisilla siltarakenteilla epämukavuuden raja-arvot ylittyvät sillalla kävelijälle ja raitiovaunussa matkustajalle. Tulosten esitystavaksi kehitettiin kuvaaja, jonka muuttujina on sillan jännemitta ja alin ominaistajuus sekä staattinen taipuma raitiovaunun kuormasta. Suodattamalla yli viiden hertsin alimmat ominaistajuudet pois tuloksista saatiin aikaiseksi kuvaaja sillan jännemitan funktiona, jossa taipumakriteerin arvo L/δ pieneni jännemitan kasvaessa. Tuloksia vertailtiin eurokoodin rautatiesiltojen ohjeisiin ja todettiin, ettei ohjeita voi suoraan soveltaa raitiovaunuliikenteelle.

Tutkimuksen perusteella voi tehdä kaksi oleellista johtopäätöstä. Ensinnäkin jännemitaltaan suurille silloille tasaisen raitiovaunukuorman aiheuttama taipumakriteeri voidaan mukavuuskriteerien perusteella pitää alhaisena. Eurokoodin vaatiman arvon $L/600$ käyttö mukavuuskriteerinä voi johtaa ylimitoitukseen. Toisaalta muut vaatimukset kuten kansirakenteen päiden kulmamuutos ja sillan ulkonäkö voivat johtaa tiukempaan taipumakriteeriin. Lisäksi todennäköisimmät mukavuusongelmat syntyvät silloilla lyhyillä jännemitoilla. Kuvan 5.11 perusteella taipumakriteeri tiukkenee jännemitan lyhentyessä. Kevyillä alle 15 metrin jännemitan silloilla olisi hyvä tehdä dynaaminen analyysi, jos halutaan varmistaa kevyen liikenteen mukavuuskriteerin täyttyminen.

Raitiovaununliikenteen kuormittaman sillan mitoitusohjeena ei esitettyjä tuloksia voi kuitenkaan suositella suoraan käytettäväksi. Tulokset pitäisi laskea monella erilaisella raitiovaunumallilla sekä laajentaa jännemitta- ja ominaistajuusaluetta. Laskennassa on tutkittu vain taivutuksen värähdysmuotoja, joten vääntöväärähtelyn vaikutukset on jätetty huomioimatta. Lisäksi raiteen epäsäännöllisyydet täytyisi ottaa huomioon ja varmentaa tulokset kokeellisilla tutkimuksilla. Huomioitavaa on myös se, että sillan kiihtyvyyden raja-arvona on käytetty 0.7 m/s^2 , joka on kevyen liikenteen sillan raja-arvo. Vain raitiovaunuliikenteen käytössä olevalle sillalle voidaan sallia suurempia sillan kiihtyvyyksiä ja täten tulokset muuttuisivat hieman.

6. TAPAUSTUTKIMUS: KRUUNUVUORENSILTA

Edellisessä luvussa tutkittiin raitiovaunuliikenteen kuormittamia yksinkertaisia siltarakenteita muuntamalla jännemittaa ja alinta ominaistaajuutta. Laskennasta saatiin selville taipumakriteerin L/δ käyttäytyminen jännemitan ja taajuuden vaihtuessa. Tutkitaan miten saadut tulokset pätevät monimutkaisemmalle vinoköysisillalle. Vinoköysisiltana tutkitaan Kruunuvuorensiltaa.

6.1 Tausta

Helsingin Laajasaloon entisen öljysataman paikalle Kruunuvuorenrantaan ollaan rakentamassa noin 11 000 asukkaan asuinalue, jonka pitäisi valmistua vuoteen 2025 mennessä [16]. Tällä hetkellä Laajasalosta ei ole suoraa liikenneyhteyttä Helsingin keskustaan, vaan reitti kiertää Kulosaaren kautta. Tämän vuoksi on suunniteltu raitiovaunu- ja kevyen liikenteen yhteyttä Kruunuvuorenselän yli. Helsingin kaupunki järjesti silta-suunnittelukilpailun, jonka voittajaksi selviytyi kesällä 2013 WSP Finlandin suunnittelema vinoköysisilta. Kruunuvuorensillan yleissuunnitelmavaihe on tällä hetkellä valmistumassa, mutta päätöstä rakentamisesta ei ole kuitenkaan vielä tehty.

Kruunuvuorensilta on tyypiltään jatkuva betonikantinen liittorakenteinen vinoköysi- ja palkkisilta. Sillan jännemitat ovat 53 m + 3x66 m + 2x260 m + 6x62 m + 48 m. Näistä keskimmäiset 260 metrin pääjännitteet ovat vinoköysillä tuettuja (Kuva 6.1). Sillan hyötyleveys tulosilloilla on 15.3 m, josta raitiotien osuus on 9.3 m, ja kevyelle liikenteelle on varattu 5.5 m. Raitiotie ja kevyt liikenne on erotettu 0.5 m leveällä välikaistalla. Köysi-alueella pylonin kohti mentäessä hyötyleveys kasvaa, ja pylonin kohdalla välikaistan leveys on 4.5 m sillan hyötyleveyden ollessa tällöin 19.3 metriä. Sillan kansi on jäykästi kiinni pylonissa, ja muilla tuilla on pituussuunnassa liikkuva laakerointi. Silta olisi valmistuessaan kokonaispituudeltaan ja pääjännitteeltään Suomen pisin silta. [17]

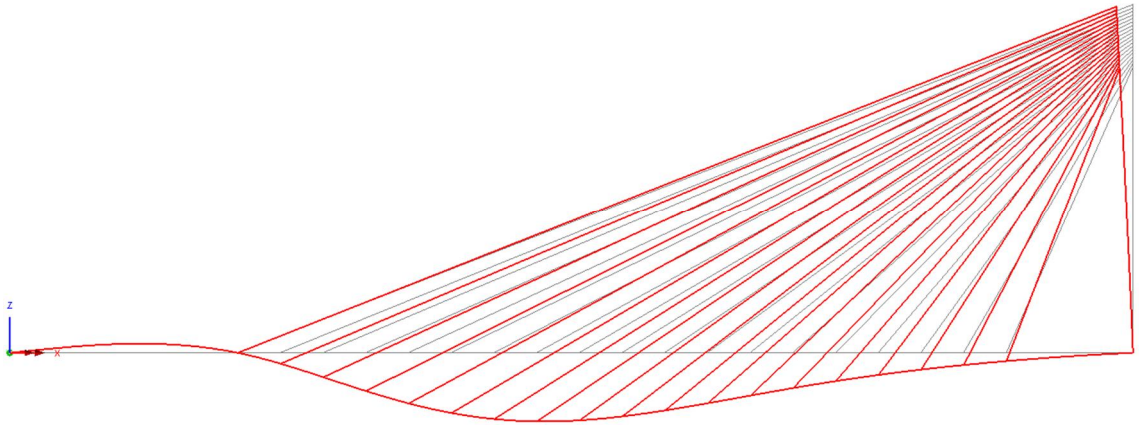


Kuva 6.1 Havainnekuva Kruunuvuorensillasta. [16]

6.2 Laskentamalli

Laskentamalli luodaan tulosillasta ja yhdestä pääjäljenteestä koostuvasta kaksiaukkoisesta rakenteesta. Koska sillan kannella on pylonin kohdalla lähestulkoon jäykkä tuenta, voidaan värähtelyt arvioida ottamalla huomioon vain toinen pääjäljenteistä. Tulosillan pituus on 66 metriä ja pääjäljenteen 260 metriä. Köysiaukkojen kohdalla sillan vaakasuuntainen taivutussäde on 3570 metriä ja tulosillalla 555 metriä, mutta rakenne yksinkertaistetaan kaksikulotteiseksi tapaukseksi olettamalla silta suoraksi. Kaksikulotteisessa tapauksessa jää myös huomioimatta vääntövärähtelyn vaikutukset. Eurokoodissa teräs- ja liittorakenteisen sillan vaimennuksen alaraja-arvoksi on annettu 0.5 %. Vinoköysisillalla vaimennus on vielä hieman pienempi. Käytetään laskennassa vaimennuksen arvoa 0 %, jolloin vaimennusta ei tule yliarvioitua ja laskenta on vaimennuksen osalta varmallalla puolella.

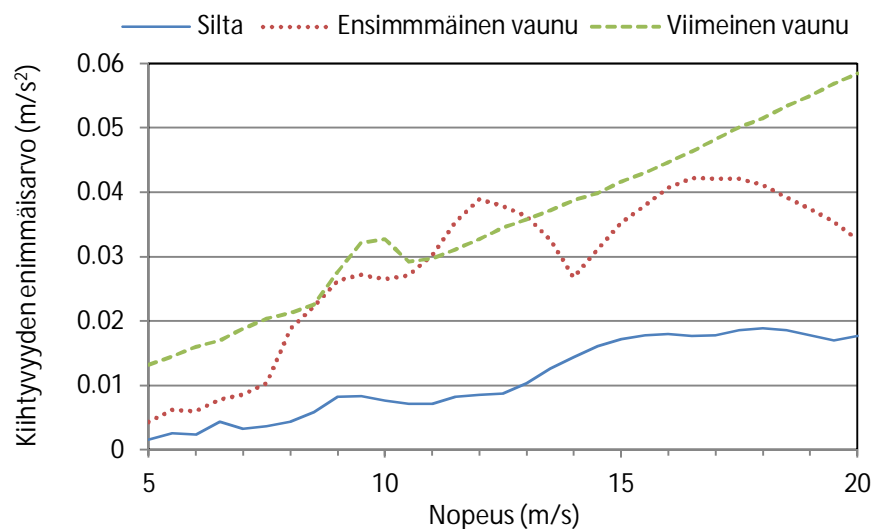
Kruunuvuorensillan yleissuunnitelman rakennelaskelmissa [18] on laskettu rakenteelle alustavat poikkileikkaukset, joiden perusteella laskentamalliin on arvioitu palkin ja köysien ominaisuudet. Köydet mallinnetaan pylonin päästä nivelellisesti kiinnitetyillä sauvaelementeillä. Pyloni mallinnetaan juurestaan kierrejousitetulla palkkielementillä. Rakennelaskelmissa on saatu sillan alimmaksi pystyvärähtelyn ominaistajuuudeksi 0.38 Hz. Pylonin ja kierrejousituen jäykkyys määritetään niin, että alimmaksi ominaistajuuudeksi saadaan 0.38 Hz ja ominaismuoto vastaavaksi kuin rakennelaskelmissa. Laskentamallilla saatu alin ominaismuoto on esitetty kuvassa 6.2



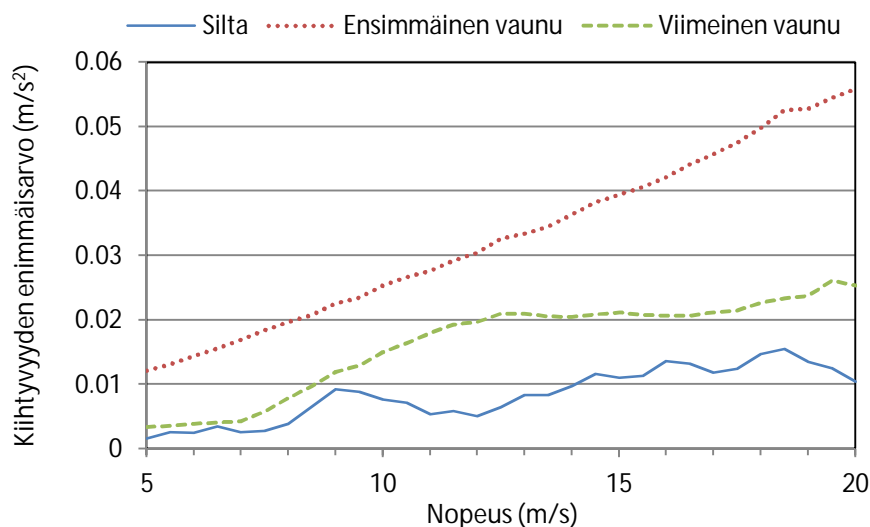
Kuva 6.2 Alin ominaismuoto 0.38 Hz.

6.3 Tulokset

Asetetaan raitiovaunukuorma 30 kN/m pääjäljenteelle. Suurin taipuma saadaan laskentamallin pisteessä 155.9 m, eli 89.9 metriä pääjäljenteen reunasta kohti pylonia. Taipuman arvoksi δ saadaan 258.7 mm, josta voidaan laskea $L/\delta = 1005$. Lasketaan raitiovaunun aiheuttamat kiihtyvyydet moodisummausmenetelmällä vaihdellen vaunun nopeutta välillä 5 – 20 m/s. Laskentavälinä käytetään 0.5 m/s ja aika-askeleena 0.02 s. Koska laskentamallissa on vain puolikas pääjäljenteestä, lasketaan tulokset raitiovaunun ajaessa pylonia kohti (Kuva 6.3) ja raitiovaunun ajaessa pylonista poispäin (Kuva 6.4). Sillan kiihtyvyyden mittauskohtana käytetään suurimman taipuman kohtaa, eli laskentamallin pistettä 155.9 m.



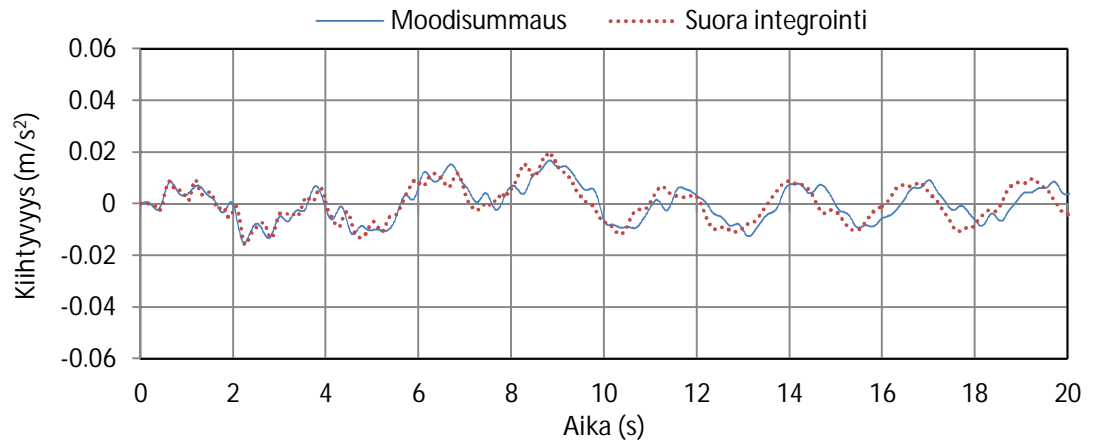
Kuva 6.3 Kiihtyvyyden enimmäisarvot raitiovaunun ajaessa pylonia kohti.



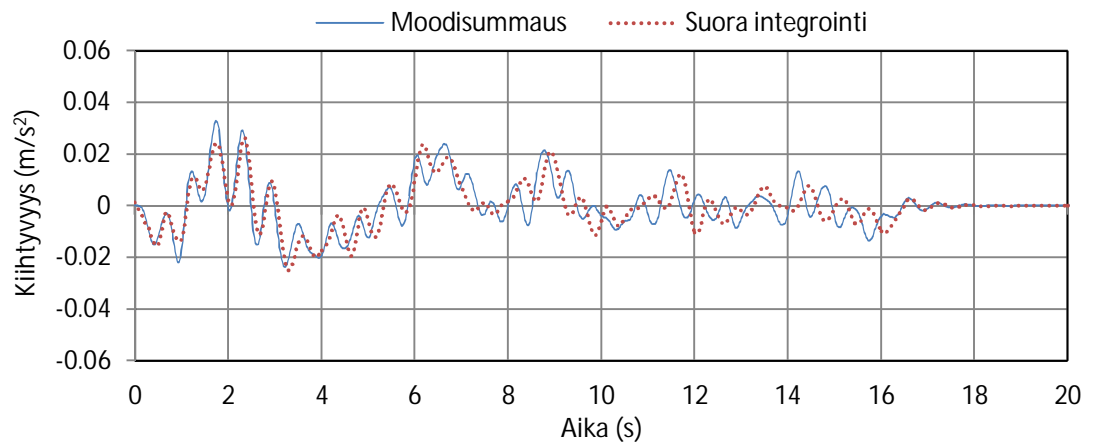
Kuva 6.4 Kiihtyvyyden enimmäisarvot raitiovaunun ajaessa pylonista poispäin.

Nähdään, että enimmäiskiihtyvyys sillalle saadaan raitiovaunun ajaessa pylonia kohti nopeuden ollessa noin 17 – 20 m/s. Enimmäiskiihtyvyys ensimmäiselle vaunulle saadaan vaunun ajaessa pylonista poispäin nopeudella 20 m/s ja viimeiselle vaunulle ajettaessa pylonia kohti nopeudella 20 m/s. Näin ollen suurinta mahdollista nopeutta 20 m/s voidaan pitää mitoittavana tapauksena. Sillan enimmäiskiihtyvyys nopeudella 18 m/s on tosin hieman suurempi, mutta ero 20 m/s saatuun tulokseen on hyvin pieni. Lasketaan siis vertailutulos suoralla integroinnilla nopeudella 20 m/s.

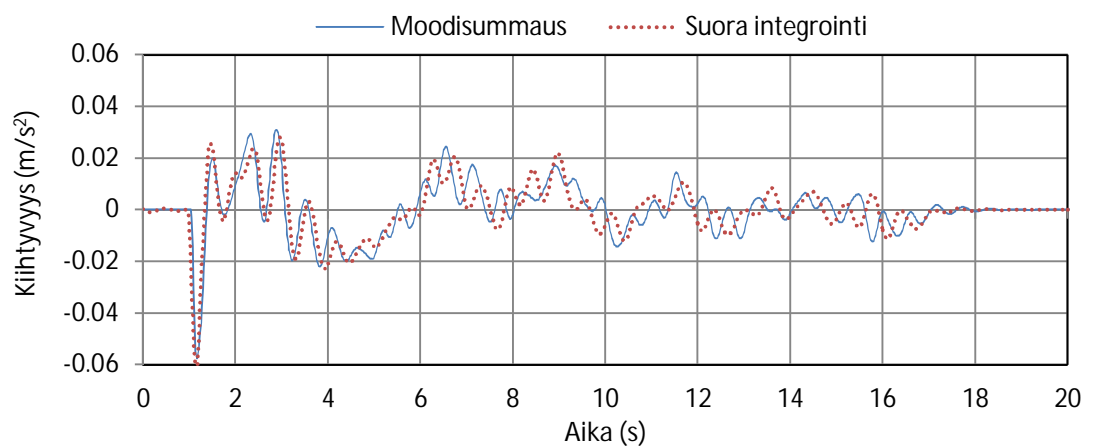
Ensimmäisen vaunun, viimeisen vaunun ja sillan pisteen 155.9 m kiihtyvyyksien aikahistoriat on esitetty (Kuva 6.5 - Kuva 6.10). Tuloksissa on sekä moodisummauksella ja suoralla integroinnilla saadut tulokset. Moodisummauksessa ensimmäisen vaunun kiihtyvyys on mitattu ensimmäisestä akselistä ja viimeisen vaunun kiihtyvyys viimeisestä akselistä. Tulokset on laskettu sekä raitiovaunun ajaessa pylonia kohti sekä raitiovaunun ajaessa pylonista poispäin. Ensimmäinen akseli poistuu sillalta ajanhetkellä $t = 16.3$ s ja viimeinen akseli ajanhetkellä $t = 17.35$ s.



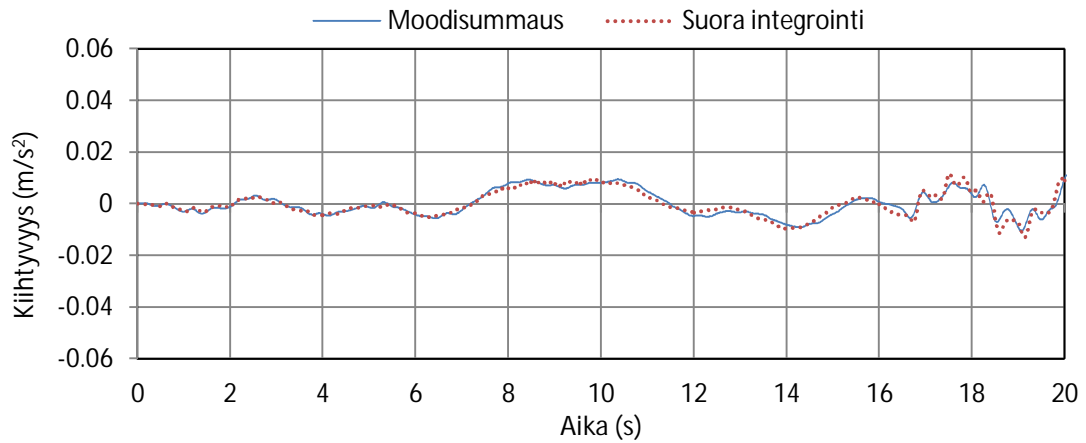
Kuva 6.5 Sillan pisteen 155.9 m kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonia kohti.



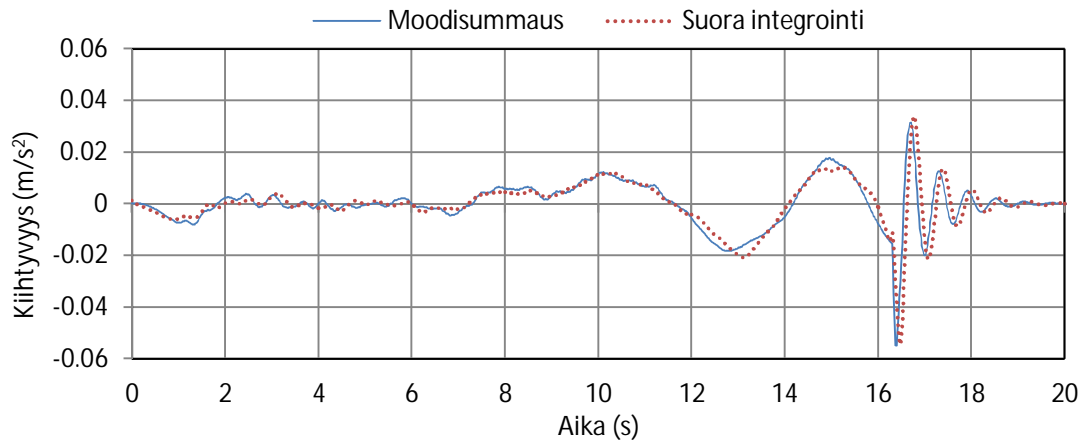
Kuva 6.6 Ensimmäisen vaunun kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonia kohti.



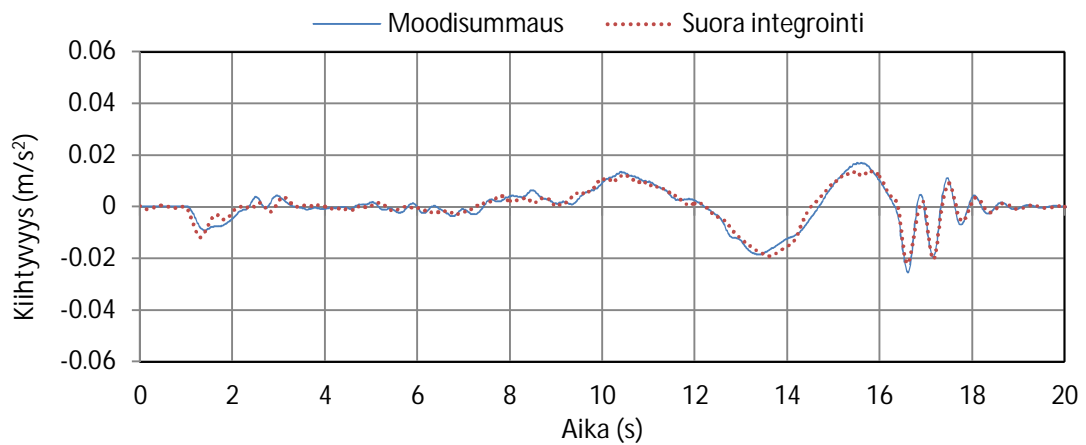
Kuva 6.7 Viimeisen vaunun kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonia kohti.



Kuva 6.8 Sillan pisteen 155.9 m kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonista pois päin.



Kuva 6.9 Ensimmäisen vaunun kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonista pois päin.



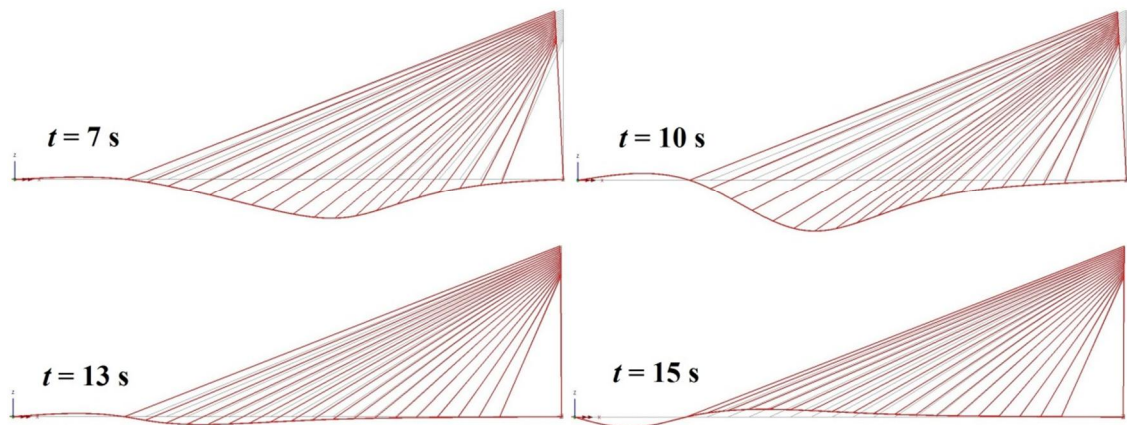
Kuva 6.10 Viimeisen vaunun kiihtyvyyden aikahistoria raitiovaunun ajaessa pylonista pois päin.

Ensimmäinen huomio kiihtyvyyksien aikahistorioista on se, että kiihtyvyydet jäävät hyvin pieniksi. Tämä huomattiin jo moodisummauksella saaduista kiihtyvyyksien enimmäisarvoista, joissa kaikki arvot pysyivät alle 0.06 m/s^2 . Huomataan myös, että moodisummauksella ja suoralla integroinnilla saadut tulokset vastaavat hyvin toisiaan. Pientä eroa näyttäisi syntyvän silloin, kun raitiovaunu ajaa tulosillalta pääjäteelle.

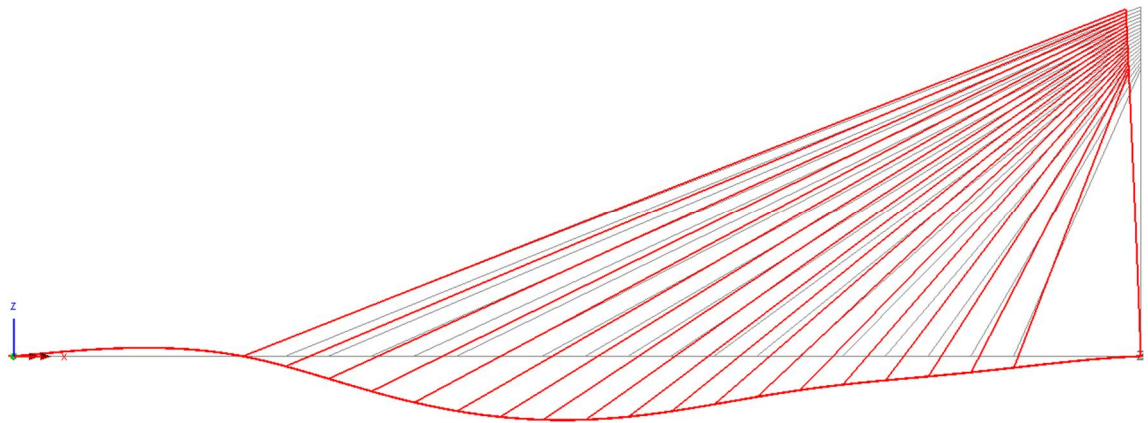
Sillan kiihtyvyydet pisteessä 155.9 m pysyvät koko ylityksen ajan alle 0.02 m/s^2 . Suurimmillaan kiihtyvyys on silloin, kun raitiovaunu on juuri ylittänyt mittauspisteen tulosillalta tullessaan ajanhetkellä $t = 8.8 \text{ s}$. Kiihtyvyyden enimmäisarvo 0.02 m/s^2 on huomattavasti pienempi kuin eurokoodin mukavuuskriteerin vaatima 0.7 m/s^2 . Myöskään ISO standardin kävelytien epämukavuuden raja-arvot eivät ylity sillalla. Näin ollen raitiovaunun aiheuttamat kiihtyvyydet eivät muodostu kävelijälle epämukavaksi.

Raitiovaunun kiihtyvyyksissä näkyy selkeä huippuarvo viimeisellä vaunulla pylonia kohti ajettaessa ajanhetkellä $t = 1 \text{ s}$, ja ensimmäisellä vaunulla pylonista poispäin ajettaessa ajanhetkellä $t = 16.3 \text{ s}$. Nämä ovat itse asiassa juuri niitä hetkiä kun raitiovaunun viimeinen akseli saapuu jo värähtelevälle sillalle ja kun raitiovaunun ensimmäinen akseli poistuu värähtelevältä sillalta. Näissä kohdissa siis alustan jäykkyys muuttuu huomattavasti, sillä laskentamallissa sillan ulkopuolisella alueella raitiovaunu kulkee täysin jäykällä alustalla. Näin alustan kulmamuuutos aiheuttaa impulssiherätteen, joka näkyy hyppäyksenä kiihtyvyyden arvossa. Huomattavaa on myös se, että raitiovaunun kiihtyvyys on pienimmillään pääjäteellä ajettaessa. Kuvasta 6.6 nähdään, kuinka raitiovaunun ensimmäisen akselin saapuessa pääjäteelle ajanhetkellä $t = 3.3 \text{ s}$ kiihtyvyydet alkavat pienentyä. Myös viimeisen vaunun kiihtyvyydessä (Kuva 6.7) nähdään vastaava ilmiö.

Raitiovaunun ajaessa pylonista poispäin nähdään, kuinka vaunujen kiihtyvyydet ovat ensimmäiset seitsemän sekuntia melkein nollassa. Tämän jälkeen kiihtyvyydessä näkyy hidas aaltoliike, jonka jälkeen vaunu tärähtää saapuessaan jäykälle alustalle. Vaunun kiihtyvyyden käyttäytyminen voidaan selittää tutkimalla sillan siirtymää eri ajanhetkillä (Kuva 6.11). Aluksi silta taipuu raitiovaunun liikkeen mukana saavuttaen ääriasennon noin kymmenen sekunnin kohdalla. Tänä aika kiihtyvyydet pysyvät hyvin pieninä, sillä siirtymät tapahtuvat hitaasti. Tämän jälkeen raitiovaunun lähestyessä tukea sillan taipuma palautuu nopeasti aiheuttaen raitiovaunulle matalataajuisen aaltoliikkeen. Ylityksen jälkeen sillalle syntyy värähdysliike, jonka ääriasento on esitetty kuvassa 6.12. Nähdään, kuinka ääriasento on vastaavanmuotoinen kuin alin ominaismuoto (Kuva 6.2), eli silta jää värähtelemään alimmalla ominaistaajuudella.



Kuva 6.11 Sillan siirtymä (700-kertainen) raitiovaunun ajaessa pylonista poispäin.



Kuva 6.12 Värähdysliikkeen ääriasento ylityksen jälkeen ajanhetkellä $t = 17.7$ s (Siirtymä 12000-kertainen).

Lasketaan ISO 2631 standardin mukaisesti painotetut neliölliset keskiarvot jokaisesta kiihtyvyydatasta kohdasta, jossa kiihtyvyydet ovat suurimmillaan. Painottamiseen käytettävä Fourier muunnos vaatii datapisteiden lukumääräksi jonkun kahden potenssin. Valitaan 128 datapistettä, jolloin 0.02 sekunnin aika-askeleesta johtuen laskentavälinä käytetään 2.54 sekuntia. Lasketut painotetut neliölliset keskiarvot (a_w) on annettu taulukossa 6.1. Standardin ”ei epämukavan” matkustusmukavuustason raja-arvo on 0.315 m/s^2 . Lasketut arvot ovat siis huomattavasti pienempiä kuin standardin raja-arvo. Tulosten mukaan raitiovaunun ja sillan pystysuuntaiset dynaamiset yhteisvaikutukset eivät siis aiheuta raitiovaunun matkustajalle epämukavuuden tunnetta.

Taulukko 6.1 Raitiovaunun kiihtyvyyden painotetut neliölliset keskiarvot.

Kiihtyvyydata	Aikaväli (s)	$a_w(\text{m/s}^2)$
Kuva 6.6	0 – 2.54	0.0050
Kuva 6.7	1 – 3.54	0.0095
Kuva 6.9	16.3 – 18.84	0.0083
Kuva 6.10	15 – 17.54	0.0045

6.4 Yhteenveto

Luvussa suoritettiin tapaustutkimuksena Kruunuvuorensillan dynaaminen analyysi. Tuloksena saatiin sillan ja raitiovaunun kiihtyvyyksien aikahistoriat nopeudella 20 m/s, joka todettiin määrääväksi tapaukseksi. Kiihtyvyydet todettiin huomattavasti pienemmiksi kuin epämukavuutta aiheuttavat arvot, ja aikahistorioista voi päätellä, että resonanssi-ilmiötä ei pääse syntymään. Sillan laskentapisteen kiihtyvyys oli koko ylityksen ajan melko tasaista ja pysyi alle 0.02 m/s^2 .

Vinoköysiosuudella raitiovaunun kiihtyvyydet olivat hyvin pieniä ja pylonista pois päin ajettaessa lähes olemattomia. Näin ollen vinoköysiosuudella raitiovaunun pystysuuntainen kiihtyvyys ja tätä myötä matkustajan epämukavuus näyttäisi määräytyvän lähes täysin muista tekijöistä, kuten raiteen epäsäännöllisyyksistä. Siirryttäessä pääjäljenteeltä tulosillalle raitiovaunun kiihtyvyys nousi sillan taipuman palautuessa. Tästä syntyvä kiihtyvyys oli kuitenkin hyvin pieni ja värähdysliike matalataajuinen, jonka vuoksi ilmiöstä ei muodostu ongelmaa. Raitiovaunun suurin kiihtyvyys syntyi kun raitiovaunu siirtyi jäykältä alustalta värähtelevälle sillalle tai värähtelevältä sillalta jäykälle alustalle.

Luvun 5 tulosten perusteella saatiin aikaiseksi raja-arvokäyrä (Kuva 5.11), jonka muuttujina ovat sillan jännemitta ja taipuma raitiovaunukuormasta 30 kN/m. Raja-arvokäyrän yhtälöksi saatiin $L/\delta = 20559L^{-0.983}$. Sijoittamalla yhtälöön Kruunuvuorensillan pääjäljenteen jännemitta $L = 260 \text{ m}$, saadaan $L/\delta = 87$. Kruunuvuorensillan laskentamallista 30 kN/m kuormalla saatiin taipumaksi $L/\delta = 1005$. Näin ollen taipuman perusteella olisi voinut arvioida, että raitiovaunun aiheuttamat pystykiihtyvyydet jäävät huomattavasti epämukavuuden raja-arvoja pienemmiksi. Suorittamalla dynaaminen analyysi todettiin, että taipuman perusteella tehty arvio pitää paikkansa.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä tutkittiin sillan ja raitiovaunun dynaamista yhteistoimintaa. Ilmiön tutkimiseen käytettiin kahta erilaista numeerista menetelmää: moodisummausta ja suoraa integrointia. Laskenta suoritettiin elementtimenetelmään perustuvaa LUSAS ohjelmistoa käyttäen. Moodisummauksella ja suoralla integroinnilla saadut tulokset vastasivat toisiaan hyvin, ja selkeää eroa syntyi menetelmästä johtuen vasta kun sillalla vaikuttavan kuorman massa oli yhtä suuri sillan massan kanssa. Laskentamenetelmät todennettiin vertailemalla saatuja tuloksia aikaisemmin tehtyihin tutkimuksiin. Työssä käytetty moodisummausmenetelmä ei ota huomioon vaunun pituuskallistuksesta johtuvaa hitausmomenttia, ja tästä johtuen menetelmillä saadut vaunun pystysuuntaiset kiihtyvyydet poikkesivat hieman toisistaan.

Raitiovaunumallina käytettiin Helsingin kaupungin uusimman Artic-raitiovaunun ominaisuuksia. Tutkittiin raitiovaunun aiheuttamia pystysuuntaisia kiihtyvyyksiä erilaisille siltarakenteille. Sillan muuttujina olivat sillan jännemitta, sillan alin ominaistaajuus ja taipuma tasaisesta raitiovaunukuormasta, joka esitettiin sillan jännemitan ja taipuman suhteen L/δ . Tutkittiin, millä sillan muuttujien arvoilla sillan tai raitiovaunun epämu-kavuuskriteerien kiihtyvyysarvot ylittyvät. Laskenta suoritettiin yksiaukkoiselle sillalle jännemittojen välillä 15 – 100 metriä ja vertailulaskentana tutkittiin jatkuvaa siltaa 20 ja 30 metrin pääjännemitalla. Lisäksi tutkittiin jousitusjärjestelmän vaikutusta tuloksiin vaihtelemalla ensiö- ja toisiojousituksen jäykkyyttä.

Tuloksista huomattiin, kuinka jännemitasta riippumatta yksiaukkoiselle palkille taipumakriteerillä L/δ oli hyppäys suuremmaksi 3 Hz alimmalla ominaistaajuudella. Tästä voitiin päätellä, että käytetty raitiovaunumalli synnyttää resonanssi-ilmiön kolmen hertsin alimmalla ominaistaajuudella. Tuloksista huomattiin myös taipumakriteerin nousu alimman ominaistaajuuden välillä 5 Hz – 10 Hz. Tämä voidaan selittää sillä, että kiihtyvyyden raja-arvo 0.7 m/s^2 syntyy korkeampitaajuisessa värähtelyssä pienemmillä siirtymillä. Tuloksista suodatettiin eurokoodin perusteella yli 5 Hz tulokset pois ja saatiin aikaiseksi taipumakriteerin raja-arvokäyrä sillan jännemitan funktiona. Huomattiin, kuinka sillan jännemitan kasvaessa taipumakriteeri L/δ pienenee.

Taipumakriteerin pienenemisen jännemitan kasvaessa todettiin johtuvan siitä, että pitkän jännemitan sillalla koko sillalla vaikuttava tasainen raitiovaunukuorma yliarvioi raitiovaunun vaikutukset. Näin ollen eurokoodin rautatiesilloille vaatimat matkustusmukavuuden taipumakriteerit voivat johtaa ylirajoitukseen raitiovaunuliikenteelle varsinkin pitkällä jännemitoilla. Toisaalta taipumakriteeri voi määräytyä muista vaatimuksista kuten sillan ulkonäöllisistä syistä. Tuloksista huomattiin myös taipumakriteeriin

äkillinen nousu jännemitan pienentyessä. Tästä voidaan päätellä, että lyhyillä jännemitoilla mukavuusongelmien syntyminen on todennäköisempää.

Taipumakriteerin raja-arvokäyrä saatiin tutkimalla yksittäistä kuormitustapausta, ja jotta voitaisiin tehdä yleisesti päteviä johtopäätöksiä, täytyisi kuormituksena käyttää useampia erilaisia raitiovaunuja. Tutkimusta pitäisi laajentaa myös lyhyemmille jännemitoille ja tutkia useampia jatkuvia rakenteita. Lisäksi laskennan tulokset pitäisi varmistaa kokeellisin tutkimuksin ja ottaa raiteen epäsäännöllisyydet huomioon.

Tapaustutkimuksena suoritettiin Kruunuvuorensillan dynaaminen analyysi. Sillan kiihtyvyys laskentapisteessä pysyi koko ylityksen ajan alle 0.02 m/s^2 , joka on huomattavasti pienempi kuin eurokoodin kevyen liikenteen mukavuuskriteerin raja 0.7 m/s^2 . Resonanssi-ilmiötä ei siis pääse syntymään. Raitiovaunun kiihtyvyys pysyi vinoköysiosuudella todella pienenä suurimpien kiihtyvyyksien syntyessä alustan jäykkyyden vaihtuessa raitiovaunun saapuessa sillalle tai raitiovaunun poistuessa sillalta. Kuitenkin myös näissä kohdissa kiihtyvyydet olivat hyvin pieniä. Kiihtyvyyksien aikahistorioista lasketut painotetut neliölliset keskiarvot olivat kaikki alle 0.01 m/s^2 . ISO standardin mukaan matkustajan mukavuustuntemus on ”ei epämukavaa” mikäli kiihtyvyyden arvo on alle 0.315 m/s^2 . Myös raitiovaunun matkustajamukavuudet ovat siis todella paljon varmalla puolella.

Huomioitavaa on, että Kruunuvuorensillasta tutkittiin vain kaksikulotteisia pystysuuntaisia vaikutuksia raitiovaunun liikkuessa tasaisella raiteella. Raiteen pystysuuntaiset ja vaakasuuntaiset epäsäännöllisyydet antavat raitiovaunulle lisäherätteen, jonka aiheuttamat kiihtyvyydet voivat aiheuttaa matkustusepämukavuutta. Lisäksi vääntöväärähtely ja sillan kaarevuus voivat vaikuttaa tuloksiin. Laskentamallin tarkkuutta voisi parantaa mallintamalla koko silta kolmiulotteisella mallilla, mutta tällöin laskenta muuttuisi hyvin raskaaksi ja varsinkin suoralla integroinnilla laskenta-ajat voisivat kasvaa liian suuriksi. Yksinkertaistetulla mallilla saadut kiihtyvyydet olivat todella pieniä, mistä voidaan päätellä että sillan ja raitiovaunun yhteistoiminnasta ei synny Kruunuvuorensillalla ongelmaa. Tämä on hyvin ymmärrettävää kun vertaa raitiovaunun ja sillan ominaisuuksia keskenään. Raitiovaunu on yli kilometrin mittaiseen massiiviseen siltarakenteeseen verrattuna hyvin kevyt ja akselit vaikuttavat pienellä alueella. Lisäksi raitiovaunu kulkee melko alhaisilla nopeuksilla.

Työn tavoitteena oli löytää menetelmiä sillan ja raitiovaunun dynaamisen yhteistoimintaongelman ratkaisuun ja parantaa rakenteiden dynamiikan ymmärrystä liikkuvien kuormien tapauksessa. Tämä tavoite onnistui hyvin. Lisäksi saatiin käsitys sillan jännemitan, alimman ominaistajuuden ja taipuman vaikutuksesta dynaamisesta yhteistoiminnasta syntyviin kiihtyvyyksiin, ja suoritettiin Kruunuvuorensillalle dynaaminen analyysi. Kehitettyjen laskentamenetelmien käyttöalue ei rajoitu vain raitiovaunuliikenteelle, ja menetelmien avulla voikin tulevaisuudessa tutkia myös esimerkiksi juna- tai metrol liikenteen kuormittamia siltoja.

LÄHTEET

- [1] Marjanen, Y. Validation and improvement of the ISO 2631-1 (1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment. 2010. Yka Marjanen. 283 s.
- [2] Griffin, M.J. Handbook of Human Vibration. Lontoo 1990. Academic Press. 988 s.
- [3] ISO 2631-1:1997, Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements, International Organization for Standardization, Geneva. 31 s.
- [4] Brandt, A. Noise and Vibration Analysis: Signal analysis and experimental procedures. 2011. John Wiley & Sons, Ltd. 438 s.
- [5] SFS-EN 1990 + A1 + AC, Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. 2009. 184 s.
- [6] ISO 10137:2007, Bases for design of structures: Serviceability of building and walkways against vibrations, International Organization for Standardization, Geneva. 44 s.
- [7] Salmi, T., Virtanen, S. Dynamiikka. Tampere 2006. Klingendahl Paino Oy. 480 s.
- [8] Salmi, T. 23140 Rakenteiden dynamiikka: Luennot kl. 2003. Tampere 2003. Tampereen teknillinen yliopisto. 192 s.
- [9] Tedesco, J.W., McDougal, W.G., Ross C.A. Structural Dynamics: Theory and Applications. 1999. Addison Wesley Longman, Inc. 816 s.
- [10] Frýba, L. Vibration of solids and structures under moving loads. Groningen 1972. Noordhoff International Publishing. 484 s.
- [11] Yang, Y.B., Yau, J.D., Wu, Y.S. Vehicle-Bridge Interaction Dynamics with Applications to High-Speed Railways. Singapore 2004. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 530 s.

- [12] Lou, P. Vertical dynamic responses of a simply supported bridge subjected to a moving train with two-wheelset vehicles using modal analysis method. *International journal for numerical methods in engineering* 2005; 64:1207-1235
- [13] LUSAS: IMDPlus User Manual and Worked Examples, LUSAS Version 15.0: Issue 2. 2014. Kingston upon Thames, Surrey, United Kingdom. 208 s.
- [14] SFS-EN 1991-2, Eurokoodi. Rakenteiden kuormat. Osa 2: Siltojen liikennekuormat. 2009. 143 s.
- [15] Raitiovaunukalusto, Helsingin kaupungin liikennelaitos, verkkosivu. Saatavissa (viitattu 4.5.2015): <http://www.hel.fi/www/hkl/fi/raitiovaunulla/kalusto/>
- [16] Frilander. J. Vinoköysisilta voitti kiistellyn Kruunuvuorenrannan siltakilpailun. Yle Uutiset. 2013. Saatavissa (viitattu 16.6.2015): http://yle.fi/uutiset/vinokoysisilta_voitti_kiistellyn_kruunuvuorenrannan_siltakilpailun/6693776
- [17] Mikkonen, A. Ojala, I. Niemelä, S. Kruunusillat yleissuunnitelma: Suunnitelmaselostus. WSP Finland Oy. (Ei vielä julkaistu)
- [18] Ojala, I. Tiirö, J-P. Kruunuvuorensilta yleissuunnitelma: Rakennelaskelmat. WSP Finland Oy. (Ei vielä julkaistu)